This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06642793 5

Mesures Électriques

Liége. — Imprimerie DE THIER, boulevard de la Sauvenière, 10.

Mesures Électriques

Leçons

PROFESSÉES

A L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE MONTEFIORE

ANNEXÉ A L'UNIVERSITÉ DE LIÉGE

PAR

Eric GERARD

DIRECTEUR DE CET INSTITUT

INGÉNIEUR PRINCIPAL DES TÉLÉGRAPHES

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LIÉGE

Avec 198 figures dans le texte

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, ÉDITEURS

Quai des Grands-Augustins, 55

1896

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
97432
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.
1898.

PRÉFACE

Dans les Leçons sur l'Électricité (¹), *que j'ai publiées précédemment, je n'ai introduit que des notions générales sur les mesures. Le présent ouvrage contient les développements du cours sur les essais électriques que je professe devant les élèves électriciens de l'Institut électrotechnique Montefiore. Ce sujet mérite une étude approfondie, car les mesures précises sont la base des progrès réalisés dans la construction des appareils électriques. Ces progrès ont été rapides parce que les Électriciens, formés dans les laboratoires, ont appliqué dès le début les procédés d'investigation rigoureux qui caractérisent les recherches physiques. Ce ne sera pas un de leurs moindres mérites d'avoir contribué à introduire dans la Technique les essais fréquents et exacts.*

J'expose dans l'Introduction *les méthodes employées pour la discussion des expériences. Ces méthodes sont appliquées, dans le cours de l'ouvrage, à de nombreux exemples; elles fixent le degré d'approximation des résultats et elles détournent les commençants*

(¹) *Leçons sur l'Électricité, 4e édition, 1895, Paris, Gauthier-Villars.*

du travers trop fréquent d'exprimer ceux-ci par des nombres de chiffres qui ne sont nullement en rapport avec la précision des mesures qui les ont fournis. Etant donnée l'approximation que l'on cherche à obtenir, la discussion des méthodes d'essai indique la rigueur à apporter dans chacune des observations qui concourent au résultat et elle permet d'utiliser aussi bien que possible le temps dont on dispose pour les expériences, ce qui est d'une importance capitale dans les laboratoires industriels.

J'ai cru bon d'examiner dans l'Introduction *les principales mesures géométriques, mécaniques et photométriques, appliquées couramment par les Électriciens, afin de leur remémorer ces mesures dont les descriptions sont éparpillées dans des ouvrages spéciaux.*

Les mesures électriques sont abordées par la description des étalons et l'exposé des méthodes générales employées pour la détermination des intensités de courant, des quantités d'électricité, des forces électromotrices, des capacités, des puissances électriques et des coefficients d'induction. Pour les essais précis, j'insiste sur l'emploi du galvanomètre Deprez d'Arsonval et de ses dérivés qui sont utilisés de plus en plus. J'ai cherché à éviter les calculs fastidieux auxquels se prêtent certains dispositifs d'expérience, tels que le Pont de Wheatstone, pour me borner aux développements mathématiques d'une utilité réelle.

Comme on le verra par l'examen de la table analytique des matières, les méthodes d'essais ont été classées de manière à venir en aide à la mémoire.

Les essais magnétiques sont traités avec l'ampleur que leur importance comporte. Depuis les travaux de MM. Hopkinson et Ewing la perméabilité et l'hystérésis du fer employé dans la construction des machines électriques sont éprouvées avec autant de

soin que la conductibilité du cuivre qui sert à la fabrication des bobines.

Après les procédés généraux de mesure viennent les applications aux essais des galvanomètres, des câbles, des lignes télégraphiques, des réseaux électriques, des piles, des accumulateurs, des machines électriques, des moteurs et des transformateurs. J'ai commencé par les applications dans lesquelles on n'utilise que des courants faibles et de basse tension que les élèves peuvent aborder sans danger pour eux-mêmes et pour les appareils qu'ils emploient. Ces premiers exemples, qui constituent d'excellents exercices par lesquels les débutants s'habituent à traiter les problèmes avec la rigueur scientifique et à comparer les résultats fournis par les diverses méthodes, ont été multipliés à dessein. C'est après seulement que viennent les essais des générateurs et transformateurs de courants intenses qui ont généralement un caractère plus industriel.

Les notations employées dans le cours de l'ouvrage ne s'écartent guère de celles proposées par M. Hospitalier; l'emploi de majuscules rondes pour les grandeurs magnétiques a été étendu autant que possible.

M. De Bast, répétiteur, et M. Brunhes, assistant à l'Institut électrotechnique Montefiore, m'ont aidé dans la revision des épreuves de ce livre. Je les en remercie.

ERIC GERARD.

INTRODUCTION.

Chapitre I.

EXÉCUTION, DISCUSSION ET COMPTES RENDUS DES ESSAIS.

Classification des méthodes d'essai. — Pour trouver la *grandeur numérique* d'une quantité, c'est à dire le rapport de celle-ci à une quantité de même espèce, choisie comme unité, deux méthodes peuvent être employées.

La première consiste à comparer la grandeur étudiée à un *étalon* représentant l'unité choisie ou un multiple de cette unité ; tel est le cas de la détermination d'une longueur au moyen du mètre. Une mesure de ce genre est dite *directe* ou *relative*.

La seconde méthode permet d'évaluer les quantités au moyen d'étalons d'espèces différentes, en se servant des relations qui unissent les grandeurs entr'elles. Par exemple, pour mesurer une surface, on ne la compare pas directement à un étalon de surface, mais on détermine ses dimensions linéaires à l'aide de l'unité de longueur, et l'on applique la relation existant entre la surface et ses dimensions. Cette mesure est appelée *indirecte* ou *absolue*.

Les mesures directes comportent elles-mêmes deux subdivi-

sions : les *méthodes par comparaisons successives* et les *méthodes par réduction à zéro*. Dans les premières, on ramène la comparaison entre la grandeur inconnue et son étalon à la comparaison de deux grandeurs d'une autre espèce. Ainsi, dans la balance romaine, le rapport de deux poids est réduit au rapport de deux longueurs. Dans les secondes, on identifie les effets de la grandeur cherchée avec ceux de l'étalon. Dans la balance ordinaire, on équilibre le poids inconnu à l'aide de poids connus.

Mesures directes. Erreurs systématiques et erreurs fortuites. — Les résultats d'essais présentent inévitablement des erreurs qui proviennent soit de la méthode employée, soit des instruments utilisés, soit de l'observateur même. Ces erreurs se divisent en deux classes.

La première comprend les erreurs, dites *constantes* ou *systématiques*, qui affectent le résultat dans un sens déterminé, toujours le même. Elles peuvent provenir d'un vice de méthode, d'une défectuosité d'appareil ou d'un défaut physique de l'observateur. Le déplacement du zéro d'un galvanomètre, la lenteur d'un observateur qui doit faire partir un chronomètre au moment où il voit ou entend un phénomène, amènent des erreurs systématiques.

On ne peut corriger ces erreurs qu'en variant les méthodes d'observation, les instruments et les observateurs ; la comparaison des divers résultats avec le résultat moyen permet d'estimer les erreurs systématiques. On peut souvent modifier les conditions d'expérience de manière qu'une erreur positive devienne négative, ce qui procure une moyenne exacte. Par exemple, le déplacement du zéro d'un galvanomètre augmente ou diminue la lecture faite sur la graduation suivant que le courant traverse l'instrument dans l'un ou l'autre sens.

Les changements, tels que ceux qui sont dus à l'influence de la température sur la longueur ou la résistance électrique des corps, des variations du magnétisme terrestre sur les aimants, de la polarisation sur la force électromotrice d'une pile, doivent être regardés comme des erreurs systématiques, qu'on peut corriger lorsqu'on connaît l'importance et le mode d'action de ces causes.

Une seconde catégorie d'erreurs, dites *fortuites* ou *variables*, sont caractérisées par la propriété de fournir indifféremment des valeurs

plus grandes ou des valeurs plus petites que le résultat vrai. Ainsi, lorsqu'un observateur mesure plusieurs fois une longueur de quelques mètres en employant un mètre étalon, il trouve généralement des nombres différents qui peuvent s'écarter aussi bien en plus qu'en moins de la valeur exacte.

Lorsque toutes les observations ont comporté le même soin, la valeur la plus probable est fournie par la moyenne arithmétique des résultats. Cette moyenne élimine, autant que possible, les erreurs variables, mais elle reste affectée des erreurs constantes qui, dans l'exemple précédent, peuvent tenir à une courbure du mètre étalon, à un défaut de graduation de celui-ci, etc., et pour lesquelles des corrections séparées doivent être apportées.

Il est important d'insister sur la nécessité d'apporter la même rigueur dans toutes les observations entrant dans la moyenne. Les débutants ont une tendance à se guider sur les prémiers résultats obtenus et à rejeter ceux qui s'en écartent, de crainte d'arriver à des tableaux discordants. D'autres fois, les opérateurs ont une idée préconçue du résultat et éliminent les observations qui s'en éloignent. Si même il connaît le résultat auquel il doit arriver, l'observateur doit agir comme s'il l'ignorait et n'écarter que les résultats qui s'éloignent de la moyenne par suite d'une faute évidente. Les derniers résultats doivent être notés avec autant de soin que les premiers; ils ont plutôt plus de valeur puisque, dans le cours des expériences, l'observateur a pu se perfectionner.

Il est bon de s'habituer à estimer le dixième de la dernière division de l'instrument dont on se sert. Si même le fil de réticule ou l'index qui sert aux lectures est un peu grossier, il vaut mieux écrire la fraction estimée en dixièmes que sous la forme $^1/_2$, $^1/_4$, quitte à mentionner que l'erreur possible de lecture est 0,5 ou 0,25 d'une division. Avec un fil de réticule suffisamment fin, on arrive très bien à estimer le dixième d'une division correspondant à 0,5 mm. L'erreur maxima comporte alors 0,05 mm.

La moyenne des résultats a d'autant plus de chances de se rapprocher du résultat vrai inconnu que les nombres trouvés diffèrent moins entr'eux. On peut avoir un terme de comparaison à cet égard en considérant l'*erreur moyenne*, définie par la moyenne des différences entre le résultat moyen et les observations isolées, abstraction faite du signe de ces différences.

Ainsi, supposons que des mesures d'une longueur aient conduit aux nombres suivants :

MÈTRES	DIFFÉRENCES
167,95	+ 19
167,45	— 31
167,60	— 16
167,60	— 16
167,87	+ 11
167,88	+ 12
168,00	+ 24
167,85	+ 9
167,82	+ 6
167,60	— 16

Résultat moyen : 167,76 Différence moyenne : 16

Le résultat est $167,76 \pm 0,16$ mètres. Ce résultat doit éventuellement être corrigé des erreurs constantes connues. Si les erreurs constantes ont varié pendant les observations, chaque résultat partiel doit être corrigé isolément, avant le calcul des moyennes.

Le nombre des observations à adopter dépend des différences que celles-ci présentent entr'elles. Si les différences sont faibles, on conçoit qu'il est inutile de multiplier les mesures. Dans tous les cas, le calcul des probabilités enseigne que le crédit qu'on doit accorder au résultat moyen croît, non pas comme le nombre d'observations, mais comme la racine carrée de ce nombre, qui dépasse rarement 10.

L'*erreur relative moyenne* est le rapport de l'erreur moyenne au résultat. Dans l'exemple précédent, cette erreur est $\frac{0.16}{167,76}$, soit environ 0,001, c'est à dire 0,1 pour 100. Comme on le verra, c'est l'erreur relative moyenne qui sert généralement de base dans la discussion des méthodes d'essai.

Les erreurs fortuites suivent une loi qui a été découverte par Laplace et qui permet de calculer l'*erreur fortuite probable* du résultat moyen, celui-ci restant éventuellement entaché des erreurs systématiques inconnues. Dans les mesures électrotechniques, celles-ci sont souvent supérieures aux erreurs fortuites et peuvent

difficilement être éliminées. Aussi est-il rarement utile, dans ces mesures, de faire les calculs compliqués qu'exige la détermination de l'erreur fortuite probable. L'indication de l'erreur moyenne suffit pour édifier sur la valeur des observations. Lorsque la précision des mesures comporte la détermination de l'erreur fortuite probable, on calcule celle-ci suivant les règles indiquées dans les traités spéciaux sur le calcul des probabilités.

Il y a un genre d'erreurs que nous avons laissées de côté. Ce sont les fautes grossières d'observation ou de calcul, les copies inexactes des résultats, etc. Souvent ces erreurs sont évidentes à la simple inspection des résultats ; on arrive à les éviter par le soin et l'ordre dans le travail.

Mesures indirectes. Erreur limite et erreur probable. — Lorsqu'un résultat est obtenu indirectement à l'aide de données expérimentales, il est important, aux points de vue de la discussion de la méthode et de la détermination des conditions d'essai les plus favorables, de fixer l'influence que présentent les erreurs moyennes commises dans les diverses observations sur l'exactitude du résultat final.

Lorsque, par exemple, l'intensité d'un courant est mesurée à l'aide de la déviation d'un galvanomètre, il est utile de vérifier quelle importance une erreur de lecture peut avoir sur la détermination de l'intensité. On arrive ainsi à définir dans quelle région de l'échelle l'influence de l'erreur de lecture est la plus faible. On peut déterminer par expérience entre quelles limites il est possible de faire varier l'intensité du courant sans apporter de modification sensible à la déviation du galvanomètre; mais il faudrait de longs tâtonnements pour déterminer dans quelle région de l'échelle l'erreur relative, due au défaut de sensibilité de l'appareil, est la plus petite. Le calcul permet de résoudre directement ce problème.

Il est non moins important d'estimer l'influence des erreurs partielles, afin de déterminer les observations qu'il est utile de faire avec le plus de soin et celles dans lesquelles une erreur a peu d'importance. On arrive ainsi à utiliser de la meilleure manière possible le temps dont on dispose.

Le résultat des mesures indirectes est entaché des erreurs systé-

matiques des observations qu'elles comportent. De plus, une erreur systématique peut encore provenir de ce que le résultat n'est pas lié aux données expérimentales par la fonction qu'on a admise. Ces erreurs constantes s'éliminent en variant les méthodes d'essai, les instruments et les modes d'observation, et en corrigeant les défauts connus.

Reste l'erreur du résultat due aux erreurs fortuites moyennes des diverses observations; voici comment on l'estime.

Supposons que le résultat cherché y soit une fonction de diverses données d'observation x_1, x_2,... x_n, sur lesquelles des erreurs δ_1, δ_2,... δ_n, peuvent être commises. Si ces erreurs sont assez faibles pour qu'il soit permis de négliger leurs carrés, on peut les supposer infinitésimales et les désigner par $dx_1, dx_2,... dx_n$; on détermine alors l'erreur du résultat en appliquant les règles du calcul différentiel, ce qui permet de simplifier les opérations. Il faut toutefois se rappeler que, dans les applications usuelles, ce procédé n'est pas d'une rigueur mathématique absolue et ne donne que des résultats approchés.

Les erreurs partielles dx_1, dx_2,... dx_n, s'estiment en ayant égard à la précision des instruments qui ont servi à effectuer les diverses observations. Si chaque observation a été répétée un certain nombre de fois d'une manière indépendante, on prend pour $dx_1, dx_2,... dx_n$, les erreurs fortuites moyennes, calculées comme on l'a vu précédemment.

De la fonction

$$y = f(x_1, x_2, \ldots x_n), \qquad (1)$$

on tire, en appelant dy l'erreur totale du résultat,

$$\pm dy = \pm \frac{df}{dx_1} dx_1 \pm \frac{df}{dx_2} dx_2 \pm \ldots \pm \frac{df}{dx_n} dx_n. \qquad (2)$$

Les erreurs partielles du résultat, dues aux erreurs des observations isolées, sont exprimées en grandeur par

$$e_1 = \frac{df}{dx_1} dx_1, \; e_2 = \frac{df}{dx_2} dx_2, \ldots e_n = \frac{df}{dx_n} dx_n.$$

Le signe des termes du second membre de (2) est indéterminé; pour connaître l'*erreur absolue limite* du résultat, on suppose que toutes les erreurs s'ajoutent, d'où

$$E_1 = e_1 + e_2 + \ldots + e_n = \frac{df}{dx_1} dx_1 + \frac{df}{dx_2} dx_2 + \ldots + \frac{df}{dx_n} dx_n.$$

Dans le cas particulier où les expériences sont conduites de manière à rendre les erreurs partielles égales, on a

$$e_1 = e_2 = \ldots = e_n = \frac{E_l}{n}.$$

L'*erreur relative limite* commise sur y est une fonction de la forme

$$\frac{E_l}{y} = \varphi(x_1, x_2, \ldots x_n). \qquad (3)$$

Lorsque la fonction y ne renferme qu'un seul terme, on trouve directement l'erreur relative limite en prenant le logarithme de la fonction et en différentiant. Tel est le cas suivant.

L'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence est proportionnelle au cube du produit de la tension par le courant :

$$I = k(ei)^3.$$

De là on tire

$$\text{Log}_{\text{nép.}} I = \text{Log}_{\text{nép.}} k + 3\ \text{Log}_{\text{nép.}} e + 3\ \text{Log}_{\text{nép.}} i.$$

En différentiant, on arrive directement à

$$\frac{dI}{I} = \frac{3\,de}{e} + \frac{3\,di}{i}.$$

Dans cet exemple, si l'on s'impose l'égalité des erreurs relatives partielles, $\frac{3\,de}{e} = \frac{3\,di}{i}$, on obtient pour l'erreur résultante

$$\frac{dI}{I} = 6\frac{de}{e} = 6\frac{di}{i},$$

c'est à dire que l'erreur relative limite du résultat est sextuple de celle qu'entraîne la lecture de l'intensité du courant.

Au lieu de supposer que toutes les erreurs partielles s'ajoutent, ce qui est le cas le plus défavorable, on peut admettre que ces erreurs peuvent être aussi bien positives que négatives. Le calcul des probabilités montre qu'alors la valeur la plus probable de l'erreur, appelée *l'erreur absolue probable*, est

$$E_p = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \ldots + e_n^2}.$$

L'*erreur relative probable* est

$$\frac{E_p}{y} = \varphi'(x_1, x_2 \ldots . x_n). \qquad (4)$$

Si l'on s'impose l'égalité des erreurs partielles, on arrive dans ces conditions à

$$e_1 = e_2 = \ldots = e_n = \frac{E_p}{\sqrt{n}}.$$

Dans l'exemple précédent, on a pour l'erreur relative probable

$$3\sqrt{\left(\frac{de}{e}\right)^2 + \left(\frac{di}{i}\right)^2};$$

si les erreurs relatives partielles sont égales, on voit que l'erreur relative probable du résultat est égale à $3\sqrt{2}$ fois celle que comporte la mesure du courant.

Conditions les plus favorables d'une mesure indirecte. — Il arrive fréquemment qu'on peut modifier les conditions d'une mesure de manière à rendre minima l'erreur relative du résultat.

Cas d'une seule variable. — Soit, par exemple, le cas de l'emploi d'un galvanomètre des tangentes shunté, qui donne l'intensité d'un courant par l'application de la formule

$$i = K \operatorname{tang} \alpha;$$

K étant un facteur qu'on peut faire varier à volonté, en modifiant le shunt employé.

On peut se poser le problème de déterminer la valeur de α qui rend minima l'erreur relative que comporte i. L'erreur absolue di, due à une erreur $d\alpha$ commise dans la lecture de l'angle, est

$$di = K \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha}.$$

L'erreur $d\alpha$ correspond à 0,5, 0,25, ... 0,1 de division de l'échelle suivant la finesse de l'aiguille indicatrice, l'écartement des traits limites et l'habileté de l'observateur.

L'erreur relative limite est

$$\frac{di}{i} = \frac{2\, d\alpha}{\sin 2\alpha} = \varphi(\alpha).$$

La condition du minimum de l'erreur s'obtient en posant

$$\frac{d\varphi(\alpha)}{d\alpha} = o.$$

Elle conduit à $\cos 2\alpha = o$ ou $\alpha = 45°$. On vérifie facilement que la dérivée seconde est positive pour $\alpha = 45°$ et que, par conséquent, on a bien affaire à un minimum. Dans beaucoup de cas, la seule inspection du résultat montre si l'on se trouve en présence d'un maximum ou d'un minimum.

Il est important de rechercher le minimum de l'erreur relative et non celui de l'erreur absolue du résultat. Dans l'exemple précédent, l'erreur absolue est minima pour $\alpha = o$; c'est la valeur pour laquelle le galvanomètre présente le maximum de sensibilité, mais alors l'erreur relative devient énorme.

Il n'est pas toujours possible de trouver des conditions d'expérience correspondant à un minimum de l'erreur. Dans le cas du galvanomètre des tangentes sans shunt, on ne peut pas modifier K de manière à obtenir, pour une valeur quelconque de i, une déviation α voisine de 45°.

Il arrive assez fréquemment que les méthodes ou les appareils dont on dispose ne permettent pas de se placer dans les meilleures conditions d'essai. Lorsqu'on mesure le courant débité par une dynamo, à l'aide d'un ampèremètre à divisions égales, le minimum d'erreur relative limite correspond à la déviation maxima; mais si le courant fourni par la machine ne dévie pas l'aiguille au delà des premières divisions de l'échelle et si l'on n'a pas d'autre appareil à sa disposition, il faut bien accepter l'erreur considérable qui en résulte. Dans ce cas, on a

$$i = \mathrm{K}\,\alpha$$

d'où

$$\frac{di}{i} = \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Pour une erreur absolue $d\alpha$ déterminée, l'erreur relative $\frac{di}{i}$ diminue quand α croît; mais α est lié aux valeurs invariables i et K.

Il en est ainsi pour toute expression telle que

$$i = f(\alpha)$$

dans laquelle les paramètres de α sont invariables et i est déterminé, car une seule valeur est alors possible pour α.

Cas de plusieurs variables. — Dans le cas de plusieurs variables, nous avons trouvé pour l'erreur relative limite

$$\frac{E_l}{y} = \varphi(x_1, x_2, \ldots x_n),$$

et pour l'erreur relative probable

$$\frac{E_p}{y} = \varphi'(x_1, x_2, \ldots x_n).$$

Le minimum de l'erreur relative limite est donné par

$$\frac{d\varphi}{dx_1} = o, \frac{d\varphi}{dx_2} = o, \ldots \frac{d\varphi}{dx_n} = o,$$

et le minimum de l'erreur relative probable par

$$\frac{d\varphi'}{dx_1} = o, \frac{d\varphi'}{dx_2} = o, \ldots \frac{d\varphi'}{dx_n} = o.$$

On distingue le minimum d'un maximum par la condition que les dérivées du second ordre soient positives, à moins que l'inspection des résultats ne rende cette distinction évidente. Souvent on trouve la condition de minimum en appliquant des règles simples: dans certains cas, la quantité à rendre minima est une somme de deux termes dont le produit est constant; la plus petite valeur de la somme correspond à l'égalité des termes.

Ainsi qu'on l'a fait remarquer à propos des fonctions à une seule variable, il n'est pas toujours possible de réaliser la condition du minimum d'erreur, mais on doit chercher à s'en rapprocher.

En général, l'importance des erreurs varie peu au voisinage du minimum, de sorte qu'il n'y a aucun inconvénient, dans la plupart des cas, à s'écarter, dans une certaine mesure, des conditions théoriques les plus favorables.

C'est la raison pour laquelle on détermine fréquemment les meilleures conditions d'expérience, en cherchant à rendre minima non l'erreur relative probable, dont l'expression affecte souvent la forme d'une fonction compliquée, se prêtant difficilement au calcul, mais bien l'erreur relative limite qui est ordinairement beaucoup plus simple.

Considérons le cas fréquent de deux variables,

$$y = f(x_1, x_2).$$

Deux solutions se présentent :

1). On peut chercher le rapport $\frac{x_1}{x_2}$ qui rend minima l'erreur relative du résultat. La connaissance de ce rapport est suffisante lorsque les conditions d'expérience fixent la meilleure valeur à donner à l'une des variables. Le problème se réduit alors à la recherche de la valeur minima d'une fonction à une seule variable.

2). Si l'on veut déterminer les valeurs de x_1 et de x_2 considérés comme variables indépendantes, on dérive la fonction successivement par rapport à x_1 et à x_2 et l'on égale les dérivées à o.

Une application fera mieux comprendre ce qui précède. Dans plusieurs mesures que nous étudierons dans le cours de cet ouvrage, la grandeur numérique c d'une quantité est obtenue en fonction de celle de son étalon c' par deux déviations galvanométriques α et α', telles que

$$c = c' \frac{\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

On peut se demander quel est le meilleur rapport de α à α', qui rende minima : *a*) soit l'erreur relative limite commise sur c, *b*) soit l'erreur relative probable faite sur la même quantité.

a). Considérons d'abord l'erreur relative limite. On a pour les erreurs partielles

$$\frac{dc}{d\alpha} d\alpha = - \frac{c' \alpha'}{(\alpha - \alpha')^2} d\alpha,$$

$$\frac{dc}{d\alpha'} d\alpha' = \frac{c' \alpha}{(\alpha - \alpha')^2} d\alpha';$$

d'où, en admettant que les erreurs de lecture $d\alpha$ et $d\alpha'$ sont égales et donnent des erreurs partielles qui s'ajoutent,

$$E_1 = \frac{c' (\alpha + \alpha') d\alpha}{(\alpha - \alpha')^2}$$

et

$$\frac{E_1}{c} = \frac{\alpha + \alpha'}{\alpha' (\alpha - \alpha')} d\alpha.$$

Posons

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = n,$$

il vient

$$\frac{E_1}{c} = \frac{n\,(n+1)}{(n-1)}\ \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

En considérant n comme seule variable, le minimum de l'erreur relative limite correspond à

$$n = 2{,}415.$$

b). Le carré de l'erreur probable du résultat est, pour $d\alpha = d\alpha'$,

$$E_p^2 = \frac{c'^2\,(\alpha^2 + \alpha'^2)}{(\alpha - \alpha')^4}\ d\alpha^2;$$

et le carré de l'erreur relative probable

$$\frac{E_p^2}{c^2} = \frac{(\alpha^2 + \alpha'^2)\,d\alpha^2}{\alpha'^2\,(\alpha - \alpha')^2} = \frac{(n^2+1)\,n^2}{(n-1)^2}\ \frac{d\alpha^2}{\alpha^2}.$$

Le minimum de l'erreur relative probable correspond à

$$n^3 - 2\,n^2 - 1 = 0.$$

On trouve approximativement $n = 2{,}2$, résultat très peu différent de celui auquel conduit la considération de l'erreur limite.

Rapports à établir entre les erreurs partielles d'un résultat indirect. — Il est à remarquer que si un résultat comporte plusieurs mesures et si quelques-unes de celles-ci admettent une approximation plus grande que d'autres, il est superflu de chercher à obtenir, pour les résultats partiels, une exactitude très supérieure à celle que permet d'atteindre l'observation la moins exacte. Cependant, pour que les erreurs partielles aient toutes la même influence, il peut arriver qu'il soit nécessaire de faire quelques observations avec plus d'exactitude que d'autres. On a vu que, dans l'évaluation du rendement lumineux d'une lampe à incandescence, la mesure du voltage doit se faire avec une précision sextuple de celle que comporte l'intensité lumineuse.

Voici un autre exemple. La résistibilité d'un conducteur de longueur l, de diamètre δ et de résistance r, est donnée par la formule

$$\rho = \frac{\pi\delta^2}{4}\,r\,\frac{1}{l}.$$

On trouve l'erreur relative limite en prenant la différentielle du logarithme de cette fonction et en supposant que les erreurs partielles s'ajoutent :

$$\frac{d\rho}{\rho} = 2\,\frac{d\delta}{\delta} + \frac{dr}{r} + \frac{dl}{l}.$$

On voit que, si l'erreur partielle commise dans l'estimation du diamètre doit être égale à celle due à la mesure de la longueur, la première évaluation doit être faite avec une approximation double de celle que comporte la seconde. On doit donc apporter beaucoup plus d'exactitude dans la mesure du diamètre, qui est précisément la plus difficile. Si l'on ne peut mesurer le diamètre à moins de 1 pour 100 près, à l'aide de la jauge dont on dispose, il est inutile d'obtenir une exactitude supérieure dans l'estimation de la longueur, puisque le complément de temps et de soin que demande cette approximation plus grande n'augmente la précision du résultat final que d'une quantité insignifiante.

Si, dans l'exemple précédent, on considère l'erreur relative probable, on obtient

$$\frac{E_p^2}{\rho^2} = 4\,\frac{d\delta^2}{\delta^2} + \frac{dr^2}{r^2} + \frac{dl^2}{l^2}. \qquad (1)$$

Si l'on exige que les erreurs relatives partielles soient égales, il vient

$$\frac{2\,d\delta}{\delta} = \frac{dr}{r} = \frac{dl}{l} = \frac{E_p}{\rho\sqrt{3}}.$$

En se donnant l'erreur relative probable admissible dans le résultat, l'équation (1) permet de déterminer les erreurs partielles relatives des diverses observations. Si, dans l'hypothèse de l'égalité de celles-ci, l'erreur relative probable sur la résistibilité doit être 0,1 pour 100 au plus, on a

$$\frac{E_p}{\rho} = 0{,}001;$$

d'où

$$\frac{2d\delta}{\delta} = \frac{dr}{r} = \frac{dl}{l} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0{,}00058,$$

soit 0,058 pour 100. Partant, la mesure du diamètre doit être faite avec une approximation de 0,029 pour 100.

Il peut être avantageux de s'imposer une autre condition que celle de l'égalité des erreurs partielles; c'est le cas lorsqu'il est possible d'accroître l'exactitude de certaines observations avec une faible dépense de temps. Il vaut mieux alors, étant donnée l'erreur permise sur le résultat, diminuer l'erreur partielle due à ces observations, de manière à pouvoir tolérer des erreurs partielles plus grandes dans les autres.

Il va sans dire que, si l'on désire le résultat le plus exact possible, il faut tâcher de diminuer toutes les erreurs partielles, sans cependant perdre son temps à rechercher des approximations mal équilibrées. Ainsi, dans la détermination de l'effet utile d'une machine à vapeur, il est inutile de mesurer la longueur de la course du piston à 0,01 pour 100 près, si une erreur de 1 pour 100 peut être faite dans l'évaluation de la vitesse.

En s'habituant à discuter les méthodes d'essai, on finit par acquérir le sens pratique, qui permet de distinguer rapidement les erreurs partielles négligeables et les corrections, relatives à l'effet de la température, de la pression, etc., qu'on peut laisser de côté. On évite ainsi l'écueil sur lequel buttent les personnes qui accordent une importance exagérée à certaines corrections qui se prêtent à des développements de calcul pour lesquels elles se sentent des aptitudes spéciales, et qui laissent de côté des circonstances physiques ou s'appuient sur des hypothèses susceptibles d'apporter des erreurs très supérieures aux précédentes.

Opérations numériques effectuées sur des valeurs approximatives. Règles à calcul. — Connaissant l'erreur moyenne relative d'un résultat direct ou l'erreur probable relative d'un résultat indirect, on peut apprécier le nombre de chiffres significatifs admissibles dans l'expression de ce résultat. Par chiffres significatifs, il faut entendre ceux qui n'ont pas simplement pour objet de déterminer la position de la virgule indicatrice des unités. Il faut que le dernier chiffre significatif soit seul incertain, l'avant-dernier étant exact. Ainsi, pour une erreur relative de 0,1 pour 100, le résultat ne doit pas comporter plus de 4 chiffres significatifs, bien que certaines opérations numériques effectuées pour calculer ce résultat puissent en fournir beaucoup plus. Si, par exemple, une

division avait donné pour quotient 19369,973, il faudrait écrire 19370, en forçant le dernier chiffre.

Voici quelques-unes des approximations qu'on peut atteindre dans les mesures électriques. Les valeurs absolues de l'ohm, du volt et du coulomb sont connues à 0,1 pour 100 près. Les étalons à mercure de l'ohm peuvent être reproduits à 0,001 pour 100 près ; les étalons métalliques de la même grandeur sont réalisés à 0,01 pour 100 près ; les résistances des boîtes usuelles sont des copies exactes à 0,5 pour 100 près. Les condensateurs isolés au mica sont étalonnés à 0,2 pour 100 près. Les mesures de résistances effectuées au pont de Wheatstone ne dépassent pas ordinairement l'approximation de 0,2 pour 100. La détermination électrolytique de l'intensité d'un courant peut atteindre l'approximation de 0,05 pour 100. L'évaluation des forces électromotrices au moyen de l'étalon Clark permet une approximation de 0,1 pour 100. Le coefficient de self-induction des bobines sans fer peut s'estimer à 0,3 pour 100 près ; mais, avec les bobines à noyau en fer, l'erreur peut atteindre 3 à 4 pour 100. L'emploi des ampèremètres et des voltmètres usuels entraîne des erreurs généralement supérieures à 0,5 pour 100. Dans les mesures industrielles qui cumulent les erreurs du voltmètre et de l'ampèremètre, on ne dépasse ordinairement pas l'exactitude du centième. C'est la raison pour laquelle il est recommandé d'utiliser la *règle à calcul* pour les opérations numériques effectuées sur les résultats des mesures industrielles. Cet instrument, dans les mains d'une personne exercée, abrège les opérations, évite les erreurs grossières et épargne beaucoup de peine. Il a l'avantage de conserver sensiblement la même approximation à tous les calculs effectués sur une même échelle. Se prêtant au calcul des résultats au fur et à mesure que s'effectuent les observations, il permet, en cas d'erreur, de recommencer celles-ci pendant que l'expérience est encore montée. Pour les mesures industrielles, la règle de 26 cm ou celle de 52 cm suffisent. Pour les calculs plus précis, on peut utiliser la règle héliçoïdale de Fuller, qui procure une approximation de 0,02 pour 100. Ces utiles appareils constituent un outillage qui devrait se trouver sur

la table de tous les ingénieurs, de même que les formulaires donnant les tableaux des carrés des nombres, des cubes, etc.

Interpolation. — Il arrive fréquemment qu'on ne peut réaliser les conditions physiques requises pour amener un appareil de mesure dans une position déterminée. Par exemple, il se peut qu'on ne parvienne pas à graduer le courant qui traverse un galvanomètre de manière à amener l'aiguille sur une division δ donnée de l'échelle, mais qu'on connaisse deux intensités voisines i_1 et i_2, pour lesquelles l'aiguille occupe des positions δ_1 et δ_2, situées de part et d'autre de la position requise. Les valeurs des courants étant peu différentes, on est alors en droit d'admettre, si ce n'est pas la règle, que les déviations sont proportionnelles aux intensités dans les limites observées. Une simple proportion fournit la valeur du courant inconnu.

$$\frac{\delta_2 - \delta_1}{i_2 - i_1} = \frac{\delta - \delta_1}{x - i_1};$$

d'où l'on tire

$$x = i_1 + \frac{(\delta - \delta_1)(i_2 - i_1)}{\delta_2 - \delta_1}.$$

On ne peut extrapoler en dehors des limites d'observation en adoptant le procédé ci-dessus qu'à la condition de s'écarter très peu de ces limites.

Préparation d'un essai. Notes d'expérience. Rapports. Représentation graphique des résultats. — On ne doit exécuter un essai qu'après avoir étudié consciencieusement la méthode à employer et discuté, au préalable, les meilleures conditions d'expérience.

La méthode étant connue et un schéma bien net de l'installation ayant été tracé, on procède au placement des appareils d'essai en adoptant le plus grand ordre dans la disposition de ceux-ci. En ce qui concerne les connexions électriques, on ne saurait apporter trop de soin dans l'arrangement des fils, ni de propreté dans les contacts des conducteurs, des fiches et des clefs de circuit. Des négligences sous ce rapport entraînent souvent de longues recherches de dérangements. On évitera de tordre les fils de connexion sous forme de boudins qui accroissent inutilement la résistance et la self-induction des circuits.

Il faut se persuader que la préparation des expériences constitue la partie la plus difficile et souvent la plus longue d'un essai.

L'expérimentateur relève dans un carnet de notes toutes les observations au fur et à mesure que celles-ci sont exécutées. Les notes doivent être assez nettes pour qu'une personne au courant de la méthode d'essai puisse les comprendre.

On enregistre soigneusement les circonstances de l'essai, en commençant par la date et l'heure, la température de l'air ambiant et les autres conditions physiques. Pour avoir négligé de noter la température, on ne peut faire les corrections, souvent très importantes, que l'effet de celle-ci entraîne.

Les calculs conduisant aux résultats et la discussion de ceux-ci sont établis de manière à permettre de revoir aisément la suite des opérations.

Après l'essai, on dresse un rapport ou compte rendu de celui-ci. Le rapport rappelle la théorie de la méthode employée, donne une courte description des appareils utilisés, si ceux-ci n'ont pas été décrits déjà dans un rapport précédent; il énumère toutes les données d'expérience et reproduit bien nettement les calculs numériques, à l'aide des signes spéciaux; enfin, les résultats y sont mis en évidence sous forme de tableaux bien ordonnés.

Lorsque les résultats fournissent les variations d'une grandeur en fonction d'une autre grandeur indépendante, par exemple les variations de la résistance d'un conducteur en fonction de sa température, ou celles de la force électromotrice d'une dynamo en fonction du courant débité, il est utile de représenter graphiquement ces variations en se servant de papier millimétré. On adopte, autant que possible, pour le rapport un format capable de contenir les feuilles de diagrammes non pliées. Le format du papier ministre est généralement suffisant. Après avoir choisi des échelles de coordonnées convenables, on porte les valeurs de la variable indépendante en abscisses et les résultats correspondants en ordonnées. Les points ainsi définis sont précisés par l'intersection des deux branches de petites croix ou par les centres de petits cercles. On trace alors, à la main ou au pistolet, la courbe moyenne qui satisfait le mieux aux points trouvés.

L'échelle des ordonnées peut différer de l'échelle des abscisses

pour éviter des courbes qui s'étendent trop en longueur ou en hauteur. Il peut être utile, dans le même but, de commencer à noter les ordonnées ou les abscisses à partir d'une valeur différente de o, ce qui correspond à un simple transport des axes de coordonnées.

Les représentations graphiques offrent de nombreux avantages. Elles permettent d'embrasser d'un coup d'œil l'ensemble des résultats, de juger de la concordance ou de la divergence des observations et d'interpoler des résultats intermédiaires ; en outre, elles permettent de juger, par analogie, de la forme de la fonction algébrique qui a le plus de chance de représenter la loi empirique du phénomène.

Si le diagramme est une droite ou s'en rapproche sensiblement, la fonction cherchée est évidemment

$$y = a + bx.$$

Comme l'on a, d'après la formule de Mac Laurin,

$$y = f(x) = f(o) + \frac{x}{1} f(o) + \frac{x^2}{1.2} f''(o) + \dots,$$

la fonction inconnue peut, en général, se mettre sous la forme

$$y = a + bx + cx^2 + \dots,$$

si les coefficients décroissent rapidement.

On peut employer cette formule parabolique, réduite à trois termes, lorsqu'à une partie de courbe sensiblement rectiligne succèdent des ordonnées croissant plus rapidement que les abscisses.

Si l'on a affaire à une courbe dont la première partie est sensiblement rectiligne et dont les ordonnées croissent ensuite de moins en moins rapidement de manière à tendre vers une asymptote parallèle à l'axe des abscisses, on essaiera la fonction hyperbolique

$$y = \frac{ax}{1 + bx}.$$

C'est le cas de la courbe empirique du magnétisme de Frölich.

Si les ordonnées du diagramme croissent ou décroissent rapidement, il y a lieu de tenter une fonction exponentielle, telle que

$$y = a\, e^{bx}$$

ou

$$y = a\, e^{-bx}.$$

Enfin, si les ordonnées sont périodiquement positives et négatives, on trouve la solution dans une fonction circulaire

$$y = a \sin bx + a' \sin b'x + \ldots,$$

qui, dans beaucoup de cas, peut être réduite à un terme.

Les valeurs les plus probables des paramètres de ces fonctions se déterminent par l'application de la méthode des moindres carrés.

Il est prudent de ne pas attribuer une portée théorique à une fonction ainsi déduite empiriquement, parce qu'on serait conduit à des extrapolations erronées. Une extrapolation semblable a fait attribuer une limite nulle à la perméabilité du fer.

Chapitre II.

MESURES GÉOMÉTRIQUES ET MESURES MÉCANIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Longueur et diamètre des conducteurs cylindriques. Jauge Palmer. Jauge à cadran. — La mesure de la résistibilité des conducteurs amène à déterminer leur longueur et leur diamètre. Lorsque ces conducteurs sont formés de fils cordés, il convient de mesurer séparément l'un des brins du câble.

Si la longueur considérée est de l'ordre du mètre, on se sert d'un mètre étalon, divisé en millimètres, le long duquel on tend le conducteur, après avoir tracé deux repères sur celui-ci. A l'œil nu, on juge de la longueur à moins d'un millimètre près. Avec une loupe on peut apprécier la longueur avec une exactitude qui varie du $^1/_{5000}$ au $^1/_{10000}$, suivant l'habileté de l'observateur. La correction pour la température est négligeable dans une mesure de ce genre.

La mesure des diamètres s'effectue le plus souvent à l'aide de la *jauge Palmer*. L'appareil comprend un étrier E E′ (fig. 1), dont une des branches est traversée par une vis butoir *b* et l'autre par une vis micrométrique *v* dont le pas correspond généralement à $^1/_2$ mm.

La tête de cette dernière vis porte un manchon M qui entoure l'écrou E'. Le conducteur est serré entre les deux vis. L'écartement de celles-ci se lit sur une graduation rectiligne qui indique le nombre de tours de la vis micrométrique.

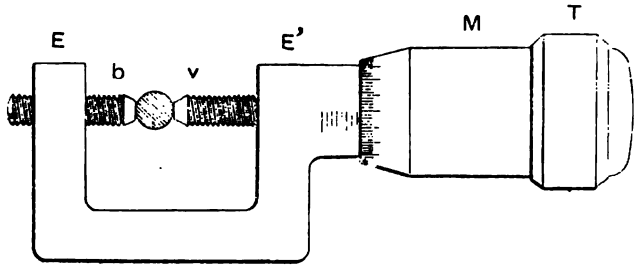


Fig. 1.

Les fractions de tour se mesurent à l'aide de la graduation circulaire tracée sur la base du manchon M et divisée d'ordinaire en 50 parties. Lorsque la vis mobile touche le butoir, il faut que le zéro de la graduation circulaire corresponde exactement au zéro de la graduation rectiligne. Le réglage se fait par la vis *b*.

Afin de ne pas déformer le fil par la pression, on n'agit pas directement sur le manchon M, mais on tourne ce dernier à l'aide d'une tête T, qui glisse à frottement doux sur le manchon.

Pour la mesure des fils minces, on utilise une *jauge à cadran*. Le fil est placé entre un butoir d'agate fixe *b* (fig. 2) et un butoir semblable *b'* porté par un levier *l* pivotant autour d'un point O. Ce levier porte un secteur denté *s*, qui engrène avec un pignon *p*, fixé sur l'axe d'un autre secteur *s'*. Ce dernier fait tourner un pignon *p'*, qui entraîne une aiguille se déplaçant devant un cadran. 100 divisions de ce dernier correspondent généralement à 1 mm. d'écartement des butoirs. La pression du butoir *b'* sur le fil est très légère; elle est donnée par un secteur *s''* qui engrène avec *p'* et dont l'axe est sollicité par un ressort spiral S.

Les fils ayant une section très variable par suite de l'usure et de la déformation de la filière, il est nécessaire, pour obtenir le diamètre moyen, de comparer les épaisseurs dans une même section et de mesurer les variations du diamètre dans des sections équidistantes.

Lorsqu'on connaît le poids spécifique du métal employé, la

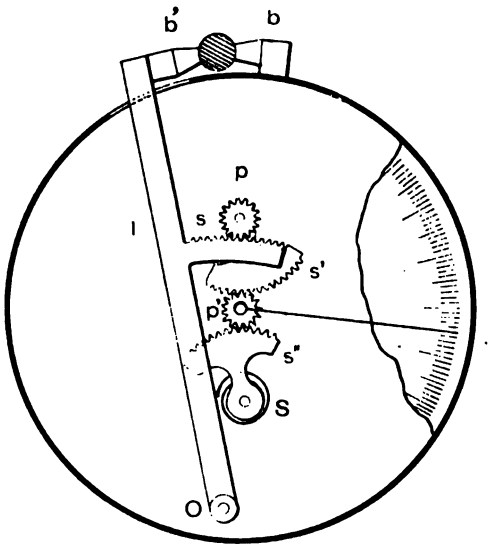


Fig. 2.

détermination la plus exacte du diamètre moyen d consiste dans la pesée d'une longueur connue l de fil. On a

$$d = \sqrt{\frac{4\,p}{\pi\, l\, \delta}},$$

p étant le poids trouvé.

Mesure des angles. Lecture directe. Lecture par réflexion. Méthode subjective et méthode objective. — L'une des mesures les plus fréquentes que les électriciens aient à effectuer est celle des angles, qui peut se ramener à la comparaison de deux longueurs, celle de l'arc et celle du rayon. L'unité d'angle est le *radiant* pour lequel l'arc est égal au rayon. Elle correspond en degrés du cercle à

$$\frac{360^\circ}{2\pi} = 57^\circ\ 17'\ 44''.$$

S'il s'agit de lire l'angle compris entre deux positions d'une aiguille aimantée portée par un pivot ou suspendue par un fil

flexible, la méthode la plus simple consiste à fixer à l'aiguille un index effilé qui se déplace sur un cercle divisé en degrés, dont le centre est sur la verticale passant par le point de suspension de la tige aimantée. Afin d'éviter l'erreur de parallaxe, on fixe un miroir dans le plan de la graduation et l'on dispose l'œil de manière que l'index se confonde avec son image dans la glace. La lecture se fait ainsi dans un plan normal à la graduation. Ce mode direct de lecture ne permet pas une grande précision lorsque les angles sont faibles, à cause de la faible longueur des aiguilles indicatrices.

Pour apprécier les petits angles, on adopte les *lectures par réflexion*. On fixe à la pièce mobile un miroir et l'on détermine l'angle que fait un faisceau lumineux projeté sur le miroir avec le rayon réfléchi. Cet angle est précisément double de celui dont le miroir et, par suite, la pièce mobile ont tourné. On obtient de la sorte un faisceau indicateur auquel on peut donner une longueur de plusieurs mètres.

Il y a deux manières distinctes d'effectuer la lecture par réflexion. La première, due à Poggendorff et à Gauss, peut s'appeler méthode subjective. La seconde, imaginée par Lord Kelvin, est la méthode objective.

Méthode subjective. — On fixe au système mobile un miroir plan passant par l'axe de rotation ou situé légèrement en avant de cet axe. La fixation se fait à l'aide de quelques gouttelettes d'une dissolution de gomme-laque dans l'alcool, ou mieux à l'aide de trois griffes qui soutiennent les bords du miroir. Ce dernier moyen évite la déformation de la glace qui peut résulter de la dessication de la colle.

Devant le miroir se place une lunette à réticules croisés, supportée par un trépied à vis calantes et portant une échelle horizontale (fig. 3). Celle-ci se dispose à une distance de 1 à 3 mètres du miroir, normalement à l'axe optique de la lunette, qui est elle-même orientée de manière que le plan vertical passant par son axe optique soit perpendiculaire au miroir dans sa position de repos et passe par son centre (fig. 4).

Pour cela, on commence par déterminer approximativement la position de l'échelle, en vérifiant, à l'aide d'une cordelette, si le miroir est sensiblement à égales distances des deux extrémités de l'echelle. On place le support de la lunette de niveau au moyen des

vis calantes, et l'on règle la position de l'oculaire et l'inclinaison de la lunette jusqu'à ce qu'on voie, dans le miroir, l'image du

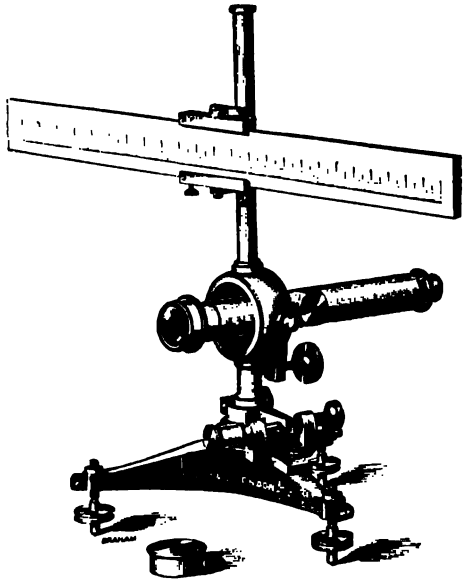


Fig. 3.

milieu de l'échelle. On vérifie ensuite si, en déplaçant angulairement le miroir de quantités égales de part et d'autre de la position d'équilibre, on lit des écarts égaux sur l'échelle.

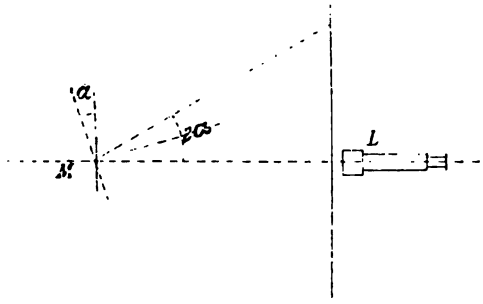


Fig. 4.

Les chiffres indiquant les divisions sont doublement renversés, afin de permettre l'emploi d'une lunette à deux lentilles. Le zéro

de la graduation peut se trouver au milieu de l'échelle ou à l'une des extrémités. Dans le premier cas, les divisions de part et d'autre du zéro sont distinguées par des colorations différentes, rouge d'un côté, noire de l'autre. Il est souvent difficile d'assurer un bon éclairage de l'échelle. Les échelles tracées sur papier blanc doivent être disposées, le jour, en face d'une fenêtre et, le soir, être éclairées par une rampe à gaz ou par des lampes à incandescence. Les jets de gaz sont disposés au-dessus du rayon visuel pour que le mouvement de l'air chaud ne gêne pas les lectures. Lorsqu'on emploie des lampes à incandescence, il convient de vérifier éventuellement si le courant qui les traverse n'influence pas le galvanomètre voisin. On doit à MM. Siemens et Halske des lampes à incandescence à longs filaments droits qui conviennent spécialement pour l'éclairage des échelles. Parfois, celles-ci sont en verre dépoli et éclairées par transparence.

Il résulte des dispositions décrites ci-dessus que, pour un angle de déviation α de l'aiguille, on lit dans la lunette une longueur δ telle que

$$\text{tang. } 2\alpha = \frac{\delta}{l},$$

l étant la distance du miroir à l'échelle.

On déduit de là

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{ arc tang. } \frac{\delta}{l} = \frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{l} - \frac{1}{3}\frac{\delta^3}{l^3} + \frac{1}{5}\frac{\delta^5}{l^5} \cdots\right).$$

Si les angles sont inférieurs à 3°, il suffit de retenir

$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{\delta}{l} - \frac{1}{6}\frac{\delta^3}{l^3}.$$

On peut éviter ce calcul en adoptant une échelle courbée en arc de cercle de rayon l. On a alors rigoureusement

$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{\delta}{l}.$$

La méthode subjective est très précise, mais elle est fatigante pour la vue. Dans les mesures industrielles, on lui préfère la méthode objective.

Méthode objective. — Pour exécuter cette méthode, on remplace habituellement le miroir plan par un miroir concave.

A la lunette on substitue une lampe placée derrière l'échelle et envoyant un pinceau de lumière sur le miroir, grâce à une ouverture percée sous le milieu de l'échelle (fig. 5). Celle-ci est placée à une distance et dans une position telles que l'image de la flamme vienne se projeter sur le milieu de la graduation. Le plus souvent cette distance est voisine de 1 mètre. Si l'appareil mobile est pourvu d'un miroir plan, on concentre les rayons à l'aide d'une

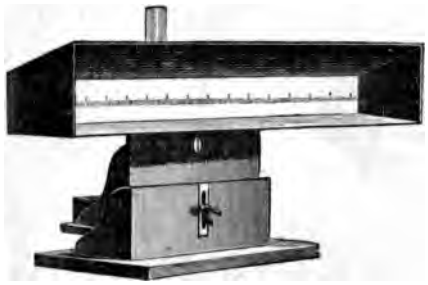


Fig. 5.

lentille convergente placée sur le parcours du faisceau incident. Les lectures se font dans un demi-jour, afin de distinguer nettement l'image. Celle-ci a la forme d'un trait lumineux si l'orifice qui livre passage au faisceau est une fente verticale. On lit alors les divisions limitées par l'un des bords de l'image. Il est préférable d'employer une ouverture circulaire ou carrée traversée par un fil vertical. On obtient ainsi une image coupée par l'ombre du fil.

Ces systèmes présentent l'inconvénient d'obliger l'opérateur à se tenir penché entre l'échelle et l'appareil pour faire les lectures.

Une amélioration notable consiste à tracer la graduation sur une échelle translucide, en toile à calquer, par exemple. Dans ce cas, l'image est très nette pour un observateur placé derrière l'échelle sur le prolongement du faisceau réfléchi. Les lampes à flamme employées avec ces échelles se placent sur le côté, dans une lanterne, et leur lumière est dirigée sur le système mobile par un miroir incliné placé derrière le milieu de la graduation (fig. 6).

Lorsqu'on utilise des appareils de mesure peu influençables par les courants voisins, on peut employer comme source lumineuse une lampe à incandescence, qui se dispose derrière l'échelle. La partie rectiligne du filament, émettant un faisceau lumineux à travers un orifice percé dans la lanterne, donne sur la graduation une

image très nette, qui peut être vue dans une salle éclairée par la lumière diffuse du jour, lorsque l'observateur a le soin de tourner

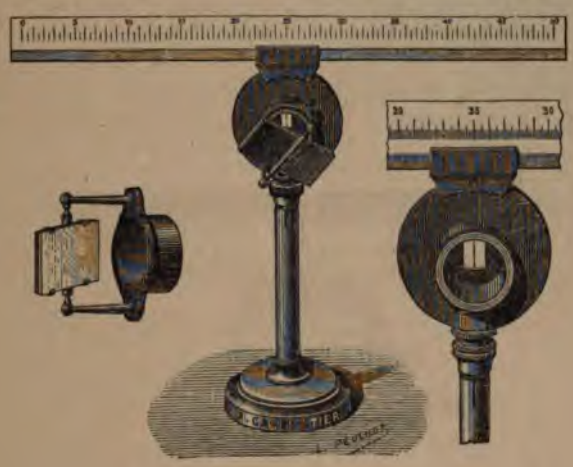


Fig. 6.

le dos aux fenêtres. On peut se passer de lanterne, en couvrant l'ampoule de la lampe d'une couche de noir de fumée, dans laquelle on ménage une fenêtre longue et étroite.

Mesure des forces faibles. Divers modes de suspension des équipages mobiles. — Dans les appareils de mesure, on doit souvent équilibrer des forces électriques ou magnétiques de faible intensité. On adopte, dans ce but, soit la réaction d'un champ magnétique sur un aimant, soit l'action de la pesanteur, soit la force élastique d'un fil ou d'un ressort de suspension.

Dans un galvanomètre à aimant mobile, c'est le champ magnétique terrestre qui fait équilibre à l'action électromagnétique du courant. Si l'action terrestre est trop faible, on peut y ajouter celle d'un aimant directeur fixe, placé dans le voisinage de l'aiguille mobile de manière à exercer un couple qui vient en aide au couple terrestre. Au contraire, on réduit la force antagoniste, en orientant l'aimant directeur de telle sorte que l'action terrestre soit neutralisée en tout ou en partie.

On a un exemple de l'emploi de la pesanteur comme force antagoniste lorsqu'on équilibre l'attraction de deux bobines plates,

parallèles et horizontales, traversées par des courants de même sens, en fixant la bobine mobile à l'un des bras du fléau d'une balance dont l'autre bras porte un plateau qu'on charge de poids.

Un autre exemple est la suspension bifilaire des électromètres à quadrants. Lorsqu'une palette électrisée est soumise à un couple situé dans le plan horizontal, on peut équilibrer ce couple en suspendant la palette à deux fils minces, ff' (fig. 7), légèrement écartés. Par suite du déplacement angulaire de la palette, le centre de gravité du système remonte, ce qui produit un couple antagoniste qui, pour les déviations faibles, est proportionnel à l'angle de torsion, à l'écartement des fils, au poids suspendu et inverse-

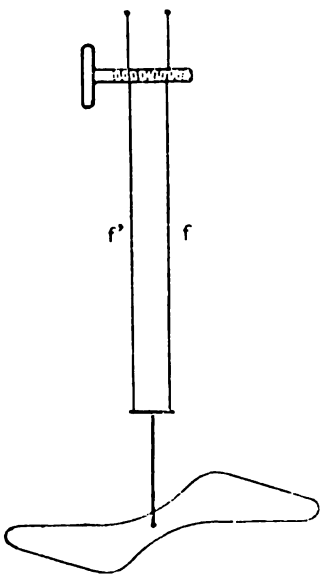


Fig. 7.

ment proportionnel à la longueur de la suspension. Ce système n'est guère employé que lorsqu'il est nécessaire de pouvoir varier le couple antagoniste, ce qui est possible en modifiant l'écartement des brins. Pour cela, on fait passer ceux-ci sur les deux moitiés d'une vis présentant deux séries de filets de sens inverses. En tournant cette vis dans un sens les deux brins se rapprochent, tandis qu'ils s'éloignent si l'on tourne la vis en sens inverse.

La pesanteur sert enfin de force antagoniste dans un grand nombre de galvanomètres industriels où l'action électromagnétique est équilibrée par des poids exerçant des couples variant avec les déplacements du système mobile.

Réaction élastique. — La suspension unifilaire est l'exemple le plus fréquent d'une réaction élastique antagoniste. Son action est souvent combinée à l'une des précédentes. C'est Coulomb qui, le premier, a utilisé la réaction de torsion d'un fil pour mesurer les couples électriques. Il a reconnu expérimentalement que le couple de torsion d'un fil vertical, dévié de sa position d'équilibre, est proportionnel à l'angle de déviation, à la 4e puissance du diamètre du fil et inversement proportionnel à la longueur de celui-ci.

$$c = k \frac{d^4}{l} \alpha.$$

Le coefficient k varie avec la nature du fil et sa température ; il est proportionnel au module d'élasticité du fil.

L'influence considérable du diamètre fait rechercher les corps les plus tenaces, qui permettent de réduire cet élément autant que possible. Parmi les corps conducteurs, l'argent et le bronze phosphoreux sont particulièrement avantageux, eu égard aux rapports de leur élasticité à leur ténacité. Mais certains isolants sont très supérieurs aux conducteurs à cet égard, la soie et le quartz entr'autres.

Les fils de soie, les plus employés, ont une ténacité 13 fois supérieure à celle des fils d'argent, ce qui permet de réduire considérablement le diamètre et, par suite, la réaction de torsion de ces fils. Si le poids à supporter est lourd, on réunit plusieurs brins en un faisceau. Le couple de torsion est alors à peu près égal à la somme des couples fournis par les divers fils composants.

Pour préparer une suspension, on dévide les fibres intérieures d'un cocon dégraissé au moyen d'une lessive alcaline. On sépare les deux brins qui composent chaque fil et l'on détord ces brins en y suspendant un poids pendant quelques semaines. Les fils ainsi apprêtés sont liés aux pièces qu'ils doivent supporter. On assure l'invariabilité des nœuds par une gouttelette de gomme-laque.

Le fil de cocon a l'inconvénient de se tordre sous l'influence des variations hygrométriques de l'air. M. Vernon Boys a évité cet

inconvénient en substituant à la soie des fils de quartz qu'on obtient sous une grande ténuité en étirant rapidement une gouttelette de quartz fondue au chalumeau oxhydrique. Ces fils jouissent d'une ténacité extrême. Ils se fixent au moyen de cire à cacheter.

Depuis quelques années, on utilise des fils métalliques aplatis qui, à ténacité égale, possèdent une sensibilité à la torsion supérieure à celle des fils ronds. MM. Ayrton et Perry ont comparé deux fils de suspension de même section, l'un rond de 0,254 mm de diamètre, l'autre rectangulaire de 0,7128 mm sur 0,0712 mm. Pour un même couple, la déviation est 5 fois plus grande avec le second fil ; l'effet de cisaillement est moitié moindre, ce qui diminue les chances de déplacement du zéro et, dans le cas où la suspension doit être traversée par un courant, le refroidissement est à peu près double avec la bande.

On doit donner à la suspension unifilaire une assez grande longueur, lorsque les angles de torsion dépassent quelques degrés, afin de ne pas atteindre la limite d'élasticité, ce qui produirait une torsion permanente.

Pour réduire la longueur des suspensions et, par suite, la hauteur des appareils, on utilise la disposition suivante : la force directrice est développée par un boudin métallique dans l'axe duquel est tendu un fil de soie qui supporte l'équipage mobile. Un tel système est susceptible de résister à des torsions considérables. La permanence des ressorts à boudin est remarquable. M. Kohlrausch cite un ressort d'acier dont l'élasticité n'a pas varié de 1 pour 1000 en 7 ans.

Pour fabriquer des ressorts réguliers, on enroule le fil en spires serrées sur un mandrin cylindrique, puis on use la surface extérieure du boudin, de manière à supprimer les fibres les plus déformées. Le boudin garde alors la forme qu'on lui a donnée.

Enfin, dans quelques appareils, on fait usage de ressorts directeurs en forme de spiral, en réduisant ainsi au minimum l'espace occupé en hauteur ; l'équipage mobile pivote alors entre pointes.

La chaleur fait varier l'élasticité des fils métalliques. Le coefficient de torsion à t° est

$$K_t = K_0 (1 - \alpha t - \beta t^2).$$

Pour le cuivre,

$$\alpha = 5{,}2 \times 10^{-4} \text{ et } \beta = 2{,}8 \times 10^{-7}.$$

Ces variations sont négligeables dans les appareils industriels.

Quelquefois, on utilise l'allongement des ressorts à boudin pour mesurer des efforts dirigés suivant leur axe. Les allongements élastiques sont sensiblement proportionnels aux efforts qui les déterminent; mais ils ont l'inconvénient d'être très faibles et partant difficiles à apprécier avec exactitude, sans le secours de procédés optiques ou mécaniques spéciaux.

MM. Ayrton et Perry ont remarqué que, lorsqu'on suspend un poids à un ressort à boudin fixé par le haut, l'extrémité inférieure tend à tourner d'un angle proportionnel à la tension. Pour évaluer cette rotation avec exactitude, il suffit de fixer à l'extrémité libre une longue aiguille indicatrice normale à l'axe du ressort.

Mesure des temps. — Un assez grand nombre de mesures électriques entraînent la détermination de la durée d'un phénomène. Tel est le cas pour l'estimation de la durée d'une oscillation complète du système mobile d'un galvanomètre animé d'un mouvement périodique isochrone. On observe le passage du système oscillant par sa position d'équilibre ou par l'une de ses positions extrêmes, à l'aide de l'un des procédés décrits pour la mesure des angles, et l'on estime, à l'aide d'un chronomètre, la durée d'un nombre déterminé d'oscillations complètes.

Les *compte-secondes* employés à cette fin sont des appareils dans lesquels l'aiguille des secondes peut être mise en mouvement à l'instant précis du commencement des observations et arrêtée à la fin de celles-ci, en appuyant simplement le doigt sur un bouton.

Pour les expériences très précises, on préfère les *compte-secondes à pointage*, dans lesquels, au lieu d'arrêter l'aiguille, on inscrit, par un point noir sur le cadran, la position de l'aiguille des secondes au moment des passages ou des séries de passages.

Enregistrement des déviations. Procédé de M. Richard. Procédé photographique. Méthode de l'auteur. Méthode de Frölich. —

Lorsque les oscillations sont très rapides, il est préférable de recourir à leur enregistrement.

Nous indiquerons, à cette occasion, les procédés généraux employés pour enregistrer les déviations des systèmes mobiles autour d'un axe.

Il est souvent utile d'inscrire automatiquement les déviations d'un galvanomètre. Un enregistreur remplit l'office d'un observateur fidèle et infatigable lorsqu'il s'agit de phénomènes à allure lente. Il permet aussi de saisir au vol et d'inscrire des déplacements qui, par leur rapidité, échappent à l'analyse de nos sens.

La fig. 8 montre l'appareil Richard employé pour enregistrer les déviations de l'aiguille d'un galvanomètre.

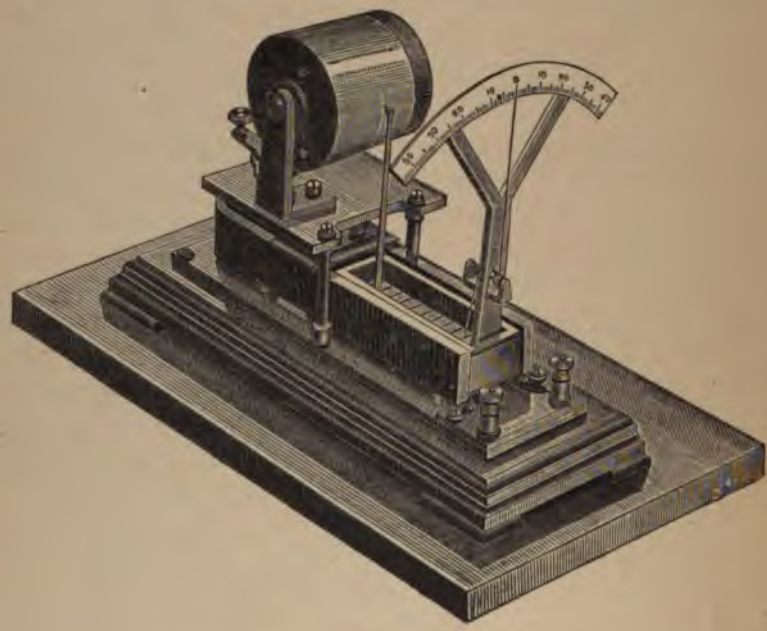


Fig. 8.

La pièce mobile porte une tige flexible terminée par une plume remplie d'encre à base de glycérine. L'absorption de l'humidité de l'air par la glycérine entretient la limpidité de l'encre. Cette plume appuie contre un tambour recouvert de papier divisé et animé d'un

mouvement de rotation, grâce à un mécanisme d'horlogerie intérieur. La combinaison des déplacements de la plume et du tambour trace sur le papier une courbe continue qui représente les déviations en fonction du temps.

Ce procédé n'est pas applicable à l'enregistrement des oscillations rapides ; il ne peut pas non plus être utilisé avec des galvanomètres à suspension délicate dont les déplacements seraient gênés par le frottement de la plume sur le tambour. On préfère alors enregistrer les oscillations par un procédé photographique.

Le système mobile est placé dans une chambre obscure devant un cylindre animé d'un mouvement de rotation rapide et aussi uniforme que possible. Un faisceau de lumière, provenant d'une lampe à arc voltaïque, est projeté sur un miroir que porte le système oscillant et réfléchi sur une feuille de papier photographique sensible recouvrant le cylindre enregistreur. Le faisceau est concentré à l'aide de lentilles de manière à donner une image bien nette sur le papier. Les oscillations sont ainsi enregistrées sous forme d'une courbe périodique que le développement de la feuille sensible fait apparaître. Pour graduer les abscisses de la courbe, qui figurent les temps, on enregistre à côté de celle-ci les oscillations d'un diapason de période connue. A cette fin, un miroir est fixé sur l'une des branches du diapason dont le mouvement est entretenu par un mécanisme analogue à celui des sonneries trembleuses. Grâce à un faisceau de lumière réfléchi par le miroir, on obtient sur le cylindre enregistreur une courbe périodique constituant l'echelle des temps.

L'auteur a simplifié ce procédé.

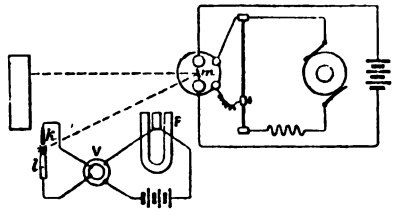


Fig. 9.

Dans la fig. 9, *m* représente le miroir concave d'un galvano-

mètre traversé par des courants à variations rapides. Sur ce miroir on envoie un faisceau lumineux intermittent produit par l'étincelle secondaire d'une bobine d'induction V, éclatant entre une pointe de charbon *l* et un fil épais de magnésium *k*. Les interruptions du circuit primaire de la bobine sont réglées par un électro-diapason F. Le faisceau lumineux, réfléchi par le miroir et concentré par une grande lentille biconvexe, vient former une image de l'étincelle sur une feuille de papier sensible tendue, soit sur un cylindre possédant un mouvement rotatif, soit sur une planchette verticale animée d'un mouvement de descente. On obtient ainsi une courbe pointillée lors du développement de l'image; en menant par les points successifs des normales à la direction du déplacement du papier, on gradue l'axe des temps en intervalles de durée égaux et déterminés.

S'il n'est pas nécessaire de connaître la valeur des intervalles, mais si l'on désire simplement diviser l'axe des temps en parties d'égale durée, on peut, au lieu du diapason, employer simplement le ressort interrupteur de la bobine de Ruhmkorff. Pour obtenir une étincelle bien nette, on ajoute une bouteille de Leyde en dérivation par rapport aux bornes secondaires.

Afin de montrer à un auditoire la forme des courbes représentant les courants périodiques, M. Frölich fait usage du dispositif représenté dans la fig. 10. Une lampe à arc envoie un faisceau lumineux convergent sur un petit miroir fixé, vers le milieu du

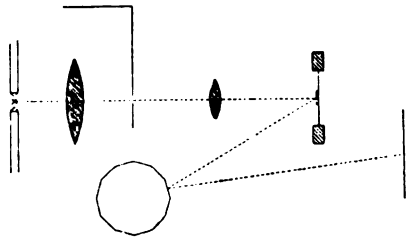


Fig. 10.

rayon, au diaphragme d'un téléphone parcouru par les courants étudiés. Les rayons réfléchis vont frapper un prisme dont les faces sont couvertes de miroirs plans et auquel on imprime un mouvement de rotation rapide. Le faisceau est enfin reçu par

un écran translucide. Lorsque la vitesse de rotation des miroirs tournants est convenablement réglée par rapport à la période des courants qu'il s'agit de représenter, et lorsque ceux-ci se succèdent assez rapidement, on voit sur l'écran, en vertu de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, les courbes figurant les ondulations des courants. En remplaçant l'écran par une plaque photographique, on peut enregistrer les ondulations.

Mesure des vitesses. — Les essais des dynamos conduisent à déterminer le nombre de révolutions d'axes mobiles dont le mouvement peut être considéré comme uniforme pendant un temps donné. Pour arriver à ce résultat, on adapte à l'arbre mobile un *compte-tours* qui indique soit par une aiguille se déplaçant sur un cadran gradué, soit à l'aide de chiffres mobiles. L'axe de ces appareils, qui comportent un mécanisme des plus simples, est pourvu d'un pointeau en acier trempé et en forme de pyramide triangulaire. On pousse ce pointeau dans un trou ménagé dans l'extrémité de l'arbre de la machine. Les arêtes de la pyramide, en mordant dans les parois de la cavité, sont entraînées par l'arbre et communiquent la vitesse de celui-ci au compteur. Cependant, des glissements sont possibles ; aussi, pour atteindre une exactitude rigoureuse, est-il bon d'attacher l'axe du compteur à l'axe mobile à l'aide d'un boudin métallique fixé de part et d'autre.

Pour se servir des compte-tours à pointeau, on pousse le pointeau contre l'arbre en même temps qu'on fait partir le compte-secondes et l'on retire le pointeau quand l'aiguille du compte-secondes marque une minute. Cette façon de procéder peut entraîner une erreur par suite de l'inertie du compteur, qui fait perdre quelques révolutions au début; il est vrai que la même cause amène une légère compensation lors du retrait. Une erreur d'une demi-seconde sur une minute produit une erreur relative voisine du centième. Lorsqu'on se sert de compteurs fixés à l'arbre, on fait partir l'aiguille du compte-secondes quand le compteur est au zéro, et on l'arrête quand celui-ci marque un nombre rond de centaines ou de milliers de tours. Avec ces appareils, on détermine souvent la vitesse moyenne en comptant les tours pendant plusieurs minutes.

Les compteurs à chiffres, employés avec les machines lentes,

sont souvent à mouvement alternatif et commandés par une petite bielle, mue par l'arbre mobile.

Les compte-secondes employés dans ces expériences doivent être non-magnétiques, car les dynamos sont susceptibles d'aimanter les appareils qui ne sont pas dans ce cas et de causer ainsi des erreurs sérieuses dans la mesure du temps.

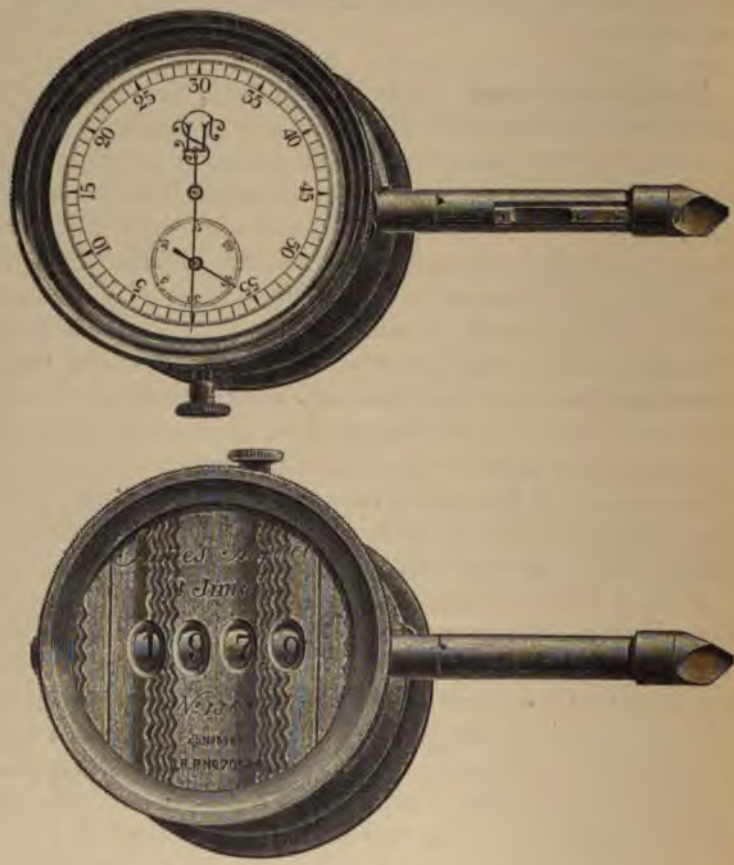


Fig. 11.

La fig. 11 montre les deux faces d'un appareil dû à M. Jaquet et renfermant un compte-tours et un compte-secondes. Ce dernier est déclenché au moment où l'on appuie le pointeau contre l'arbre

mobile et s'arrête quand on retire l'instrument, ce qui assure la simultanéité des deux lectures.

On fait quelquefois usage, pour rendre plus rapide la mesure des vitesses, *d'indicateurs de vitesse* ou *tachymètres* dans lesquels les déplacements de l'index sont commandés par des mobiles qui s'écartent plus ou moins d'une position d'équilibre en vertu de la force centrifuge. Ces appareils doivent être étalonnés fréquemment à l'aide d'une des méthodes précédentes. Enfin, avec les machines lentes, on se contente parfois d'un essai grossier consistant à compter les tours pendant une ou plusieurs minutes. Le compte des chiffres se fait à partir de zéro et non de l'unité.

On peut être amené à déterminer les variations de vitesse d'une machine pendant une révolution. Le moyen le plus simple pour arriver à ce résultat consiste à coller, sur un volant fixé sur l'arbre mobile, une bande de papier recouvert de noir de fumée. Durant la révolution du volant, on approche de la jante noircie un style porté par un diapason. La sinusoïde tracée par le style sur le papier procure une division du temps en intervalles d'égale durée, qui permet d'estimer les variations de vitesse cherchées.

Dans certains cas, il est utile d'employer la *stroboscopie* pour la mesure des vitesses. On regarde la poulie dont on cherche la vitesse à travers les trous faits dans un disque mobile. Si la vitesse de celui-ci est égale à celle de la poulie, cette dernière paraît immobile. Mais, si la vitesse de la poulie est plus faible, on voit passer successivement les rayons de la poulie comme si celle-ci tournait dans le même sens que le disque. Supposons que la poulie porte 20 divisions. Si, en 20 secondes, 4 divisions ont passé devant les trous du disque, la vitesse de la poulie est inférieure de $\frac{1}{100}$ à celle du disque. Connaissant une fois pour toutes la vitesse de ce dernier, on pourra donc déterminer la vitesse cherchée par un calcul simple.

Essai d'une installation motrice à vapeur. — L'essai complet d'une installation motrice à vapeur comporte d'abord la détermination du poids de vapeur sèche produite par kilogramme de charbon consumé ; c'est là la valeur de l'effet utile de la chaudière. Vient ensuite la mesure du poids de vapeur sèche consommée par

cheval-heure indiqué aux cylindres de la machine à vapeur. Enfin, on doit estimer le rapport entre la puissance effective disponible sur l'arbre de la machine à vapeur et la puissance indiquée, rapport désigné sous le nom de rendement organique de la machine. On juge réellement de la valeur économique de celle-ci par la consommation de vapeur correspondant au cheval-heure effectif, mais, eu égard à la difficulté des mesures au frein, il est rare qu'on détermine le travail effectif autrement que par la différence entre le travail indiqué en charge et le travail indiqué à vide.

Essai de la chaudière. — Il convient tout d'abord de préciser la qualité du combustible employé. L'indication la plus exacte est fournie par une mesure calorimétrique, faite aisément au moyen de la bombe calorimétrique et donnant le pouvoir calorifique. A défaut de cette mesure, on peut faire exécuter par un chimiste le dosage du charbon en carbone et en hydrogène et additionner les calories dégagées par la combustion de ces deux corps. Les prises d'essai du charbon doivent être prélevées sur le mélange pulvérisé de pelletées prises en divers endroits du tas servant à l'essai de la chaudière.

Quelquefois, on fait un essai de vaporisation en 2 ou 3 heures : on le commence en pesant le charbon enflammé existant sur la grille ; on mesure le charbon au fur et à mesure du chargement, et l'on pèse enfin le charbon restant sur la grille à la fin de l'essai ; on déduit les cendres du charbon consommé. Un tel essai laisse beaucoup d'incertitude.

Il est préférable de faire durer l'essai de 8 à 10 heures en faisant en sorte que la grille soit chargée à peu près de la même manière au commencement et à la fin de l'expérience. Les différences qui peuvent exister de ce chef ont alors fort peu d'influence sur l'évaluation de la quantité totale de combustible brûlé.

La manière de procéder suivante est recommandée par M. Kennedy. Après avoir vérifié tous les joints et, au besoin, remplacé les valves par des tôles pleines dans les branchements des conduites non utilisés, on fait mettre la chaudière à feu 2 heures avant l'essai, pour que toutes ses parties acquièrent leur température normale ; 10 à 15 minutes avant de commencer les expériences de vaporisation on fait arrêter le chargement, nettoyer les feux et vider le trou aux cendres ; la pression tombe, la machine fonctionnant à sa

charge normale. Quand la chute atteint 5 pour 100, on marque le niveau de l'eau dans les tubes indicateurs, on note la pression et l'on commence les relevés. A partir de ce moment, on charge du combustible qu'on pèse au fur et à mesure. On s'arrange de manière à tenir toujours prête et pesée la quantité de combustible brûlé en une demi-heure. On maintient la pression bien constante durant tout l'essai.

A la fin, on laisse de nouveau descendre la pression jusqu'à la valeur initiale, et l'on s'arrange de manière que le niveau de l'eau soit le même qu'au début. On arrête alors l'expérience.

On fait analyser un échantillon des cendres pour déterminer la quantité de combustible non consumé qu'elles contiennent encore.

Pour permettre d'évaluer l'eau vaporisée, la pompe alimentaire puise l'eau dans un bac jaugé pourvu d'un thermomètre. Le chauffeur doit maintenir le niveau de l'eau dans la chaudière aussi constant que possible pendant l'expérience ; avant de vérifier le niveau, il faut vider les tubes indicateurs afin d'établir l'équilibre des températures.

Il convient de mesurer l'eau de primage entraînée par la vapeur. Le moyen le plus commode consiste à ajouter 1 pour 100 de chlorure sodique à l'eau d'alimentation. Ce sel est entraîné par l'eau de primage. On recueille de temps en temps une petite quantité de vapeur par un orifice fait dans le tuyau qui conduit le fluide à la machine et près de celle-ci. Cette vapeur est condensée dans un serpentin. On prélève des volumes égaux de cette eau de condensation et de l'eau alimentaire. On ajoute à ces deux prises d'essai du chromate de potassium, puis une solution de nitrate d'argent. Il se forme d'abord un précipité blanc de chlorure d'argent tant qu'il reste du chlorure sodique ; à partir de ce moment, il se forme du chromate d'argent rouge. Les poids de la solution de nitrate d'argent à verser dans les deux prises d'essai pour amener la coloration rouge sont dans le rapport des quantités de sel marin contenues. On peut ainsi estimer l'eau de primage, qui, seule, a pu amener du sel marin dans la vapeur condensée. La densité des solutions de chromate de potassium et de nitrate d'argent ne joue aucun rôle.

Essai de la machine à vapeur. — Le poids de vapeur sèche consommée par cheval-heure indiqué se déduit des expériences pré-

cédentes, des données fournies par les indicateurs et de la vitesse. Dans le cas particulier où la machine est pourvue d'un condenseur par surface, le poids d'eau condensée, correction faite comme précédemment de l'eau de primage, représente très exactement la vapeur consommée. On peut alors réduire à une ou deux heures la durée de l'essai de la machine à vapeur.

Mesure de la puissance mécanique. Indicateur Crosby. Dynamomètre de transmission Von Heffner-Altenek. Frein à cordes. — La détermination du rendement d'une dynamo conduite par un moteur à vapeur nécessite l'estimation du travail fourni par le moteur. Ce travail est égal à l'énergie mécanique développée par la vapeur dans les cylindres, diminuée des pertes dues aux frottements de la machine.

Pour estimer le travail de la vapeur, on se sert d'*indicateurs* qui permettent de déterminer la pression moyenne de la vapeur dans le cylindre. L'un des plus employés pour l'essai des machines à grande vitesse, utilisées fréquemment pour conduire les dynamos, est l'*indicateur Crosby*, fig. 12 et 13.

Fig. 12.

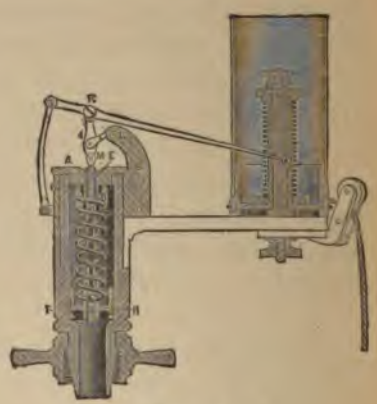


Fig. 13.

On visse sur chacune des extrémités du cylindre à vapeur un petit cylindre contenant un piston sollicité vers le bas par un ressort taré, à double hélice. A une rotule portée par le ressort est adaptée une tige traversant librement le fond supérieur du

cylindre et dont les déplacements sont amplifiés par une série de tringles articulées qui déplacent l'extrémité d'un style en laiton sur une feuille de papier préparé au blanc de zinc, enroulée autour d'un tambour. Ce dernier reçoit un mouvement alternatif lié avec celui du piston moteur, par l'intermédiaire d'une corde de chanvre attachée à un levier basculant mis en mouvement par la tige de ce piston. Le bras du levier est proportionné de manière que la course du piston corresponde à peu près à une révolution du tambour mobile. La corde reste toujours tendue grâce à un ressort de rappel, à boudin, disposé à l'intérieur du tambour. Il faut que, dans sa position moyenne, le levier soit normal à la direction de la corde et que le plan dans lequel il oscille soit sensiblement tangent au tambour mobile, pour que les déplacements angulaires de celui-ci soient proportionnels aux chemins parcourus par le piston de la machine. Il convient que les cordes conduisant les indicateurs soient aussi courtes que possible.

Les tuyaux raccordant les indicateurs au cylindre du moteur doivent être gros et courts. Il n'est pas recommandable d'employer un seul indicateur pour les deux faces du piston moteur, sauf avec les machines dont la marche très lente laisse à l'équilibre des pressions le temps de s'établir.

On commence par tracer la ligne atmosphérique à la main. On s'assure si la course des traceurs est normale et l'on a soin de purger le cylindre de l'indicateur et la conduite de raccordement immédiatement avant de prendre les diagrammes. A cet effet, l'indicateur est pourvu d'un robinet à trois voies. On laisse le traceur parcourir son cycle une dizaine de fois, ce qui permet d'obtenir une courbe moyenne.

Pour graduer l'indicateur, on l'adapte à une chaudière à vapeur où l'on fait varier la pression, celle-ci étant mesurée par un manomètre à air libre ou par des poids agissant sur le piston d'un cylindre de diamètre connu communiquant avec la même chaudière. Par ce moyen, on élimine l'effet des fuites éventuelles de l'indicateur et l'on porte celui-ci à sa température normale. A défaut d'une chaudière disposée pour ce tarage, on gradue les ressorts d'indicateur au moyen de poids connus dont on charge le centre du piston par l'intermédiaire d'une tige. A cet effet, l'appareil est maintenu,

renversé, dans un étau de manière que l'axe de son cylindre à vapeur soit bien vertical. On a soin d'immerger, au préalable, le cylindre de l'indicateur dans l'eau bouillante, afin de donner au ressort une température qui ne soit pas trop éloignée de la température normale. On détermine, par ces procédés, les pressions correspondant aux ordonnées des courbes tracées sur le tambour enregistreur.

Les diagrammes fournis par les indicateurs fixés aux deux extrémités du cylindre moteur sont calculés par la méthode de Simpson ou à l'aide du planimètre d'Amsler, en vue de déterminer la pression moyenne de la vapeur. Lorsqu'on fait usage du planimètre, on contourne deux fois chaque diagramme. Un moyen de calcul rapide, sans appareil, consiste à diviser la base du diagramme en dix parties égales et à ajouter les ordonnées correspondantes sur une bande de papier. La dixième partie de la longueur totale représente sensiblement l'ordonnée moyenne.

Connaissant, en outre, les dimensions du piston de la machine à vapeur, sa course et le nombre de tours effectués par seconde, on détermine aisément la puissance développée par la vapeur. On calcule une constante contenant toutes les données, sauf la pression moyenne et la vitesse, et qu'il suffit de multiplier par ces deux éléments pour avoir la puissance.

Il faut avoir soin de ne pas relever les diagrammes avant que l'indicateur ait atteint sa température normale. On veillera à ce que le style conserve, dans son support, la même position que pendant le tarage. Une déviation de la pointe peut altérer les ordonnées au point d'occasionner une erreur de plusieurs centièmes.

L'emploi des indicateurs expose à des erreurs qui, si elles s'accumulent, faussent notablement les résultats. Il est donc nécessaire de multiplier les essais en vue d'obtenir des moyennes. Il est bon de permuter les emplacements des indicateurs.

On inscrit sur les diagrammes relevés un numéro d'ordre et la date. Dans un tableau spécial, on note suivant des colonnes successives l'heure des essais, le numéro des diagrammes, le nombre de tours et, pour contrôle, la pression à l'entrée de la machine. On numérote, en commençant par 1, 101, 201, 301, 401, 501, les séries de diagrammes pris des deux côtés des cylindres à haute, moyenne et basse pressions.

Les *dynamomètres de transmission* permettent de mesurer directement l'effort transmis par une courroie à une machine électrique, en relevant la différence entre les tensions du brin conducteur et du brin conduit. Le modèle de M. Von Heffner-Altenek est un des plus connus. Cet appareil se fixe entre le moteur et la dynamo ; il porte sept galets entre lesquels passe la courroie (fig. 14). Le galet du milieu peut seul se déplacer ; les autres ne servent qu'à guider les deux brins, afin qu'ils exercent sur la roue médiane des pressions dirigées en sens opposés. Cette roue médiane pivote autour d'un axe qui se confond avec celui du petit galet de gauche ; elle est équilibrée par un contrepoids dont le support oscille devant une ligne de repère, et les mouvements du système sont

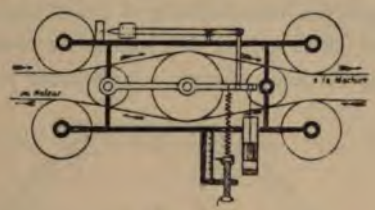


Fig. 14.

amortis par une cataracte à air. Par suite de la tension prédominante du brin conducteur, situé à la partie inférieure dans la fig. 14, la roue mobile tend à être soulevée au-dessus de sa position de symétrie, ce qu'indique l'index qui s'abaisse. Pour la ramener dans cette position, on agit sur un ressort, qui est gradué de manière à marquer directement sur l'échelle de ses allongements la différence des tensions des brins. Cette graduation s'obtient en fixant le dynamomètre verticalement et en suspendant aux deux brins de la courroie, qu'on empêche de glisser, une série de poids inégaux. Le déplacement à communiquer à l'extrémité du ressort pour amener l'index du contrepoids au repère est noté pour chaque valeur de la différence des tensions.

En même temps qu'on opère la mesure dynamométrique, on relève la vitesse angulaire de la dynamo à l'aide d'un compte-tours. En multipliant le nombre de tours par seconde par la circonférence moyenne d'enroulement de la courroie sur la poulie de la dynamo, on obtient la vitesse linéaire de la courroie. Le produit

de cette vitesse par la différence des tensions des deux brins représente la puissance mécanique absorbée par la dynamo. Il y a, toutefois, des erreurs dues au glissement de la courroie sur la poulie de la dynamo et aux frottements des galets du dynamomètre, dont une partie seulement intervient dans la puissance mesurée.

Les frottements intérieurs d'une machine à vapeur sont représentés par la différence entre le travail indiqué et le travail disponible sur l'arbre moteur. Ce dernier s'estime à l'aide du *frein de Prony* qui transforme le travail utile en frottements mesurables. D'après les travaux de M. Thurston, confirmés par les expériences de M. Dwelshauvers-Dery, le travail mesuré au frein est sensiblement égal au travail indiqué en charge diminué du travail indiqué à vide. Le frein est également employé pour mesurer la puissance utile des moteurs électriques. Pour cette dernière application, on donne souvent aux freins la forme représentée par la fig. 15, qui a

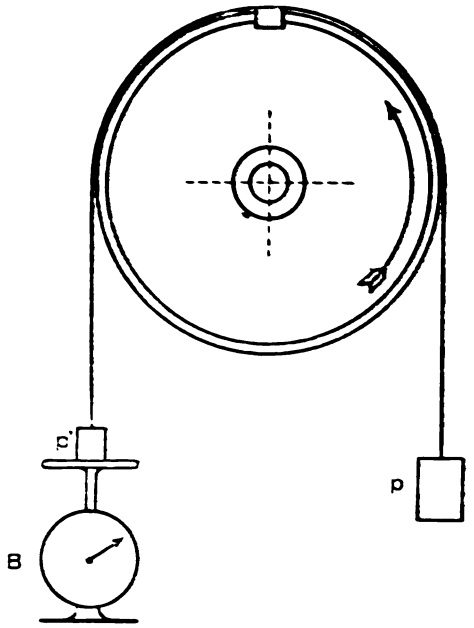


Fig. 15.

l'avantage de supprimer le réglage de l'équilibre, assez difficile à réaliser avec la forme primitive. Sur une poulie, fixée sur l'arbre

mobile, on place une bande d'acier ou de toile, retenue par un cavalier. Cette bande est attachée, d'une part, à une balance dynamométrique B surmontée d'un poids p' et supporte, d'autre part, un poids p. Le sens de rotation est tel que ce dernier poids tend à être soulevé. En appelant p'' l'effort indiqué par la balance, on peut écrire, lorsque l'équilibre existe entre le couple des frottements fr et le couple antagoniste $(p - p' - p'')\, d$,

$$fr = (p - p' - p'')\, d.$$

Si la bande est assez mince, on a sensiblement $r = d$.

En désignant par n le nombre de tours que la poulie effectue par seconde, relevé à l'aide d'un compte-tours, la puissance utile P est, en chevaux (les poids étant exprimés en kilogrammes et les longueurs en mètres),

$$P = fr \times \frac{2\pi n}{75} = (p - p' - p'')\, d \times \frac{2\pi n}{75}.$$

En watts la puissance est

$$P' = (p - p' - p'')\, d \times \frac{2\pi n}{75} \times 736.$$

La lubrification du frein, destinée à éviter un échauffement nuisible, est faite à l'aide d'eau savonneuse ou de graisse. Il convient que le frein soit bien équilibré avant la mise en place des poids dont on tient compte dans la formule précédente, c'est à dire que tout excédent de poids qui tendrait, au repos, à entraîner l'axe de la machine dans un sens ou dans l'autre soit compensé par un contrepoids convenable. Pour effectuer ce réglage, on fait reposer l'induit de la dynamo par son arbre sur deux règles horizontales pour lui donner une grande mobilité. Si la bande enroulée sur la poulie est de section uniforme et symétriquement disposée par rapport à la verticale passant par l'axe de la poulie, ce réglage est inutile.

Pour l'essai des petits moteurs, on modifie parfois le frein comme il est représenté dans la fig. 16. Une bande de toile ou une corde de chanvre, enroulée tout autour de la poulie afin d'équilibrer les efforts sur les coussinets, est fixée, d'une part, à une balance dynamo-

métrique et supporte, à l'autre bout, un plateau qui est chargé de poids.

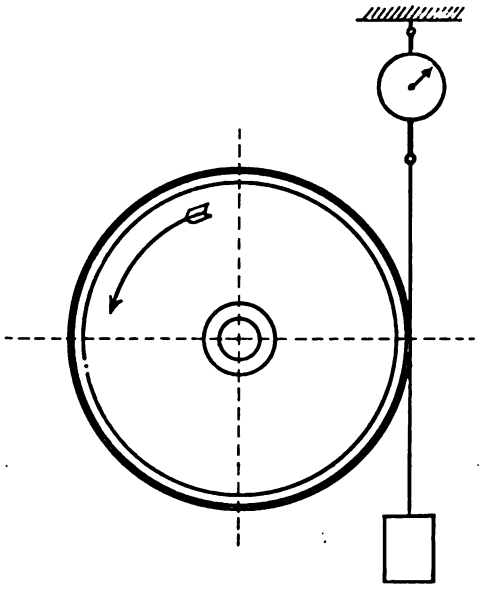


Fig. 16.

Pour refroidir la poulie, on adopte la forme indiquée dans la

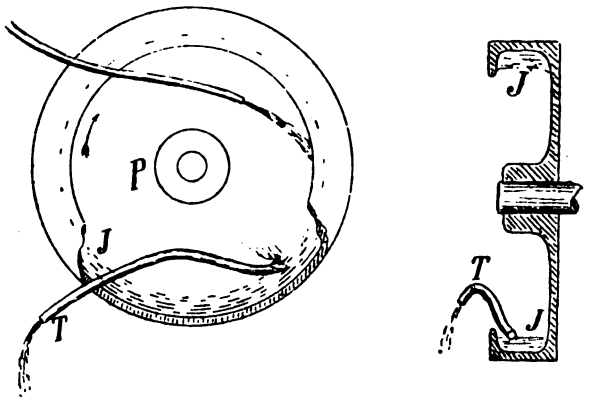


Fig. 17.

fig 17. Un jet d'eau est projeté dans une gorge intérieure de la poulie. L'eau se maintient dans cette gorge par la force centrifuge. La circulation du liquide est assurée par le tuyau T.

Lorsque la lubrification se fait à l'eau, il faut que la surface frottante S de la poulie, exprimée en mètres carrés, soit liée à la puissance absorbée P, exprimée en chevaux, par la formule

$$S = \frac{P}{500}.$$

Dans le cas où il n'y a pas de lubrifiant, la relation devient

$$S = \frac{P}{70}.$$

Chapitre III.

MESURES PHOTOMÉTRIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Grandeurs considérées en photométrie. — Un foyer lumineux, supposé réduit à un point, émet des rayons dans toutes les directions. Ces rayons peuvent être comparés aux lignes de force qui, dans la théorie des forces centrales, émergent des centres agissants. Par analogie, on dira que le flux de lumière reste constant dans un cône divergent émanant de la source.

L'*intensité lumineuse* du foyer peut être définie, comme l'intensité d'un pôle magnétique, par le rapport du flux lumineux à l'angle solide qui l'enserre. Si l'on appelle Φ le flux lumineux total issu d'un foyer punctiforme et distribué uniformément dans l'espace environnant, et I l'intensité du foyer, on a

$$I = \frac{\Phi}{4\pi};$$

d'où $\Phi = 4\pi I$, expression analogue à celle du théorème de Gauss.

Si le foyer lumineux éclaire inégalement dans les diverses directions, on peut définir l'intensité lumineuse de la source dans une

direction donnée par le rapport du flux $d\Phi$ qu'elle émet dans un angle solide élémentaire, ayant pour axe cette direction, à la valeur $d\omega$ de cet angle solide

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

Inversement, le *flux lumineux* émis par une source ponctuelle dans une direction déterminée, à travers un angle solide élémentaire, est le produit de la valeur de cet angle par l'intensité lumineuse dans la direction considérée.

Le flux total qui traverse une surface quelconque est donné par l'expression

$$\Phi = \int I \, d\omega,$$

l'intégration étant étendue à toute la surface. Si le foyer rayonne également dans toutes les directions, on peut écrire

$$\Phi = I \int d\omega.$$

Cette expression peut encore être mise sous une autre forme. En appelant $d\sigma$ un élément de la surface frappée par le flux, r sa distance à la source et α l'angle d'incidence, on a

$$\Phi = \int I \frac{d\sigma \cos\alpha}{r^2}.$$

On appelle *éclairement* en un point d'une surface frappée par le flux lumineux, le rapport du flux qui tombe sur un élément de la surface en ce point à l'aire de cet élément

$$e = \frac{d\Phi}{d\sigma}.$$

Dans le cas d'une source punctiforme rayonnant uniformément un flux Φ, l'éclairement en chaque point d'une sphère de rayon R, ayant son centre au foyer, est

$$e = \frac{\Phi}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2},$$

I désignant l'intensité de la source.

L'éclairement d'un élément de surface oblique, frappé par le flux lumineux sous un angle d'incidence α, est

$$e' = \frac{d\sigma}{d\Phi} = \frac{I \cos\alpha}{R^2}.$$

Les sources lumineuses usuelles ne sont pas punctiformes et l'on définit sous le nom d'*éclat intrinsèque* d'un foyer, le rapport de l'intensité mesurée normalement au foyer à la surface d'émission de celui-ci.

Ainsi, en désignant par I l'intensité normale d'une surface lumineuse s, l'éclat de cette dernière est

$$\varepsilon = \frac{I}{s}.$$

Si l'on considère une paroi lumineuse sous une direction oblique, le flux de lumière reçu par l'œil est moindre que si le rayon visuel était normal à la paroi, puisque la surface d'émission apparente est plus petite. Le flux émis par unité de surface d'une paroi dans une direction faisant un angle β avec la normale est

$$\varepsilon \cos\beta.$$

C'est pourquoi un globe lumineux paraît uniformément éclairé, le flux de lumière émis vers l'œil de l'observateur par chaque élément du globe étant le même que celui qu'émettrait la projection de l'élément normale au rayon visuel.

Ces considérations montrent qu'il est nécessaire, lorsqu'on compare deux plages lumineuses, de les examiner sous la même inclinaison.

Au point de vue subjectif, il n'existe aucune différence essentielle entre la notion d'éclat intrinsèque et celle d'éclairement. Par rapport à l'œil l'éclairement d'une surface est l'éclat intrinsèque de celle-ci devenue lumineuse par réflexion ou par transparence.

Voici deux autres notions, d'un usage moins fréquent que les précédentes, qui ont été définies par M. Blondel.

L'*illumination* ou, pour éviter la confusion avec une autre quantité désignée en Angleterre sous le même nom, la *lumination*

d'un objet est le produit de l'éclairement auquel il est soumis par la durée de cet éclairement,

$$j = et.$$

Cette notion est essentielle en photographie ; elle intervient également dans les phénomènes de la vision, parce que l'œil doit être soumis à une certaine lumination minima pour éprouver la sensation lumineuse.

La *quantité de lumière* est le produit du flux lumineux qui frappe un objet par la durée de l'éclairage,

$$Q = \Phi t.$$

Cette quantité doit constituer la base rationnelle des marchés relatifs à l'éclairage. C'est la quantité de lumière fournie par un foyer en un temps donné qu'on paie et non l'intensité lumineuse qui n'en est qu'un facteur.

Étalons de lumière. — Les étalons d'intensité lumineuse sont nombreux : c'est dire qu'aucun d'eux ne possède les qualités nécessaires pour justifier son emploi exclusif.

En France, on a adopté, comme étalon d'intensité, la lumière émise horizontalement par la *lampe Carcel* employée avec les précautions minutieuses indiquées par Dumas et Regnault. Voici les données réglementaires :

Diamètre intérieur du tube porte-mèche	23,5 mm.
» » » courant d'air	17,0 »
Hauteur de la cheminée	290,0 »
Diamètre intérieur de la cheminée au sommet . .	34,0 »
» » » » à la base . . .	47,0 »
Hauteur de la cheminée jusqu'au coude	61,0 »
Épaisseur du verre.	2,0 »

La mèche est une tresse de 75 brins et pèse 3,6 gr. par dm.

La lampe doit brûler avec une hauteur de flamme d'environ 40 mm et consommer 42 grammes d'huile de colza épurée à l'heure. La mèche doit être allumée en 4 points à la fois, afin de ne pas donner une flamme irrégulière. Le poids d'huile consommée, qui constitue le critérium de l'étalon, est estimé à l'aide

d'une balance spéciale sur laquelle la lampe est placée pendant les mesures. Le poids d'huile brûlée est contrôlé de 5 en 5 minutes. Lorsque la consommation varie de moins de 4 grammes au voisinage de 42 grammes, on admet que l'intensité de l'étalon suit une progression correspondante.

En Angleterre et aux États-Unis, on se sert d'un étalon moins précis, mais plus commode : la bougie de blanc de baleine *(standart candle)*, de 6 à la livre anglaise. Cette bougie donne son intensité normale horizontalement lorsqu'elle brûle avec une hauteur de flamme de 43 à 45 mm.

Les Allemands ont employé la bougie de paraffine *(Vereinskerze)*, de 12 au kilogramme, dont la flamme mesure environ 50 mm. de hauteur. Ils se servent actuellement de préférence d'une petite lampe à mèche, étudiée par *M. Von Hefner*, et brûlant de l'acétate d'amyle. La mèche est constituée par un faisceau de brins de coton sortant d'un tube en maillechort ayant 8 mm de diamètre

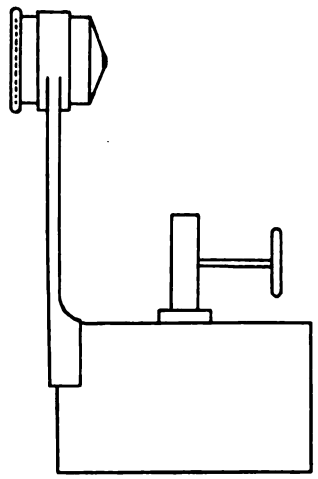


Fig. 18.

intérieur, 8,3 mm de diamètre extérieur et 25 mm de saillie. La flamme, utilisée après 10 minutes d'allumage au moins, doit avoir 40 mm du bord du tube au sommet. La hauteur s'apprécie à l'aide d'une lentille située à égale distance de la flamme et d'un verre dépoli portant une graduation verticale. L'image de la flamme

s'inscrit sur la graduation. Si la hauteur h dépasse 40 mm, on a, pour l'intensité horizontale,

$$I = 1 + 0{,}025\,(h - 40);$$

pour une hauteur inférieure,

$$I = 1 - 0{,}03\,(40 - h).$$

Il importe d'adopter l'épaisseur indiquée pour le tube à mèche, l'intensité lumineuse étant diminuée par refroidissement si le tube est trop épais et, inversement, accrue si le tube est trop mince.

Cet étalon, comme tous ceux à flamme, doit brûler dans un air pur et calme. Les impuretés de l'air diminuent la combustion et affaiblissent l'intensité lumineuse.

A diverses reprises, on a proposé des lampes étalons à gaz. *M. Giroud* a employé le gaz d'éclairage brûlant, dans un bec de forme particulière, en quantité déterminée. *M. Vernon Harcourt* a recours à un gaz spécial, de composition mieux définie que le gaz d'éclairage, et obtenu par la distillation du penthane.

M. Violle a préconisé un étalon défini plus rigoureusement que les précédents. Dans ceux-ci la température du foyer n'est pas stipulée. *L'étalon Violle* est constitué par la lumière émise normalement par un centimètre carré de platine à la température de la solidification (1775° C). Pour réaliser cet étalon, on fond environ 1 kilogramme de platine dans un creuset de chaux, à l'aide de la flamme oxhydrique, puis on laisse refroidir. Pendant la solidification du métal, qui dure quelques minutes, on observe la lumière rayonnée par la surface du bain, à travers un diaphragme percé d'un orifice de 1 cm^2.

On remarquera que les lampes étalons fournissent leur intensité normale, prise pour unité, suivant l'horizontale, tandis que l'étalon Violle doit être mesuré suivant une direction verticale. On emploie un réflecteur à 45° pour la comparaison avec les lampes, en tenant compte de son coefficient d'absorption.

L'étalon Violle, qui a été adopté en principe par le Congrès des Électriciens de 1881, est coûteux et doit uniquement servir d'étalon prototype destiné au tarage des étalons secondaires utilisés dans les mesures courantes.

Comme étalon secondaire, le Congrès des Électriciens de 1889 a recommandé la *bougie décimale*, valant 1/20 de l'étalon Violle et ainsi dénommée parce qu'elle représente un peu plus du dixième de la Carcel. Elle équivaut au dixième d'une Carcel brûlant 43,7 grammes d'huile à l'heure.

L'unité Violle n'a pas été adoptée par tous les pays, et un certain nombre de recherches ont été faites en vue de trouver un autre etalon. MM. Abney et Blondel ont recherché si le cratère des lampes à arc possède un éclat suffisamment constant pour émettre, à travers un diaphragme déterminé et sous une incidence donnée, un faisceau lumineux dont l'intensité puisse être prise pour unité. Le cratère rayonne, suivant M. Blondel, environ 160 bougies décimales par mm^2; mais les charbons occasionnent des différences suivant leur composition et, de plus, lorsque l'arc siffle, il se produit une chute d'intensité de 10 à 20 pour 100. Un tel foyer ne paraît donc pas convenir pour servir d'étalon absolu. Il pourrait peut-être servir d'étalon secondaire pour la photométrie des lampes à arc, à cause de la qualité de lumière qu'il procure; les lampes à flamme ainsi que l'étalon Violle émettent une lumière jaunâtre d'une composition spectrale très différente de celle de l'arc.

Pour la même raison, il est très utile de se servir, pour la comparaison des lampes à incandescence, d'une lampe semblable étalonnée au préalable. Les lampes à incandescence ont l'avantage de permettre une variation de l'éclairement de l'écran photométrique sans déplacement; il suffit de modifier l'intensité du courant. La maison Siemens et Halske fabrique des lampes à filament droit disposé suivant l'axe d'un tube en verre bien régulier et qui rayonne également dans les plans passant par cet axe.

Plus récemment, MM. Lummer et Kurlbaum ont proposé d'employer, comme étalon absolu, la lumière émise, à travers un diaphragme de 1 cm^2, par une bande de platine chauffée à une température déterminée inférieure à celle de la fusion. La mesure de la température est faite au bolomètre. La bande de platine est chauffée par un courant électrique jusqu'à ce que les radiations émises par le foyer à nu et à travers une couche d'eau de 2 cm, enfermée entre des plaques de quartz de 1 mm d'épaisseur, soient dans le rapport 10 : 1. Un inconvénient de cet étalon résulte de ce

que, comme dans les lampes à incandescence, la lumière émise par le ruban est sensiblement proportionnelle au cube de la quantité de chaleur développée dans l'étalon. Par suite, une erreur de 1 pour 100 dans la mesure bolométrique occasionne 3 pour 100 d'erreur sur la valeur de l'étalon.

Voici quelques indications sur les valeurs relatives des principaux étalons. Suivant M. Violle, 1 Carcel vaut :

0,481 étalon Violle,
9,62 bougies décimales,
8,91 candles,
7,89 kerzen,
9,08 étalons Hefner.

Il existe toutefois sur ces rapports des différences sensibles entre les chiffres trouvés par divers auteurs. Ces différences tiennent à la variabilité de certains étalons (les bougies de même marque peuvent présenter entr'elles des différences de plusieurs pour cents) et à l'imperfection des méthodes de mesure.

Système d'unités pratiques. — M. Blondel a proposé un système d'unités pratiques pour la mesure des grandeurs photométriques précédemment définies. Bien que ce système n'ait pas encore reçu la sanction de la pratique, nous l'adopterons dans cet ouvrage, parce qu'il permet de préciser des notions qui ont donné lieu à beaucoup de confusion.

L'unité fondamentale choisie est l'unité d'intensité lumineuse ou *Violle*, définie ci-dessus. Cette unité n'a pas eu l'agrément des entrepreneurs d'éclairage parce qu'elle est assez grande et réduit trop la valeur nominale des foyers usuels. L'unité pratique d'intensité, qui n'offre pas cet inconvénient, est la vingtième partie du Violle, appelée *bougie décimale*, ou, plus brièvement, *pyr*.

L'unité pratique de flux lumineux est le *lumen ;* c'est le flux produit par un pyr dans un angle solide égal à l'unité. Partant, un foyer punctiforme de 1 pyr rayonne uniformément un flux total de 4π lumens.

L'unité pratique d'éclairement, déjà proposée par M. Preece en 1889, est le *lux*, représenté par l'éclairement que fournit un pyr sur une surface normale aux rayons et placée à 1 m de distance. Cette unité était appelée auparavant *bougie décimale à un mètre.*

L'éclat intrinsèque d'un foyer étant une grandeur mesurée assez rarement, on a donné à son unité pratique un nom composé, *pyr par cm²*, qui rappelle sa définition, l'éclat intrinsèque d'un foyer étant, en effet, le rapport de l'intensité lumineuse à la surface d'émission normale aux rayons.

L'unité pratique d'illumination ou de lumination, acceptée par le Congrès de photographie de Bruxelles, est le *phot* ou *lux-seconde*. L'œil demande une illumination voisine de 10^{-3} phot pour donner la perception de la lumière.

Enfin l'unité pratique de quantité de lumière s'exprime par le mot composé *lumen-heure*, qui implique sa définition. Cette unité peut servir de base aux contrats d'éclairage.

Le tableau suivant résume les équations de définition et les noms des unités pratiques.

GRANDEURS	ÉQUATIONS DE DÉFINITION	DIMENSIONS	NOMS DES UNITÉS PRATIQUES
Intensité lumineuse	I	$[I]$	pyr $= \frac{1}{20}$ Violle.
Flux lumineux	$\Phi = I\,\omega$	$[I]$	lumen
Eclairement	$e = \frac{\Phi}{s}$	$[I\,L^{-2}]$	lux
Eclat intrinsèque	$i = \frac{I}{s}$	$[I\,L^{-2}]$	pyr par cm²
Illumination ou lumination	$j = et$	$[I\,L^{-2}\,T]$	phot ou lux-seconde
Quantité de lumière	$Q = \Phi\,t$	$[I\,T]$	lumen-heure.

Bases de la photométrie. — La lumière, en tant que phénomène essentiellement subjectif, ne peut se mesurer que par son impression sur la rétine. Les effets calorifiques ou chimiques des rayons lumineux permettent de déterminer l'énergie relative de ces rayons, mais non leur aptitude à l'éclairement qui constitue le but des sources lumineuses.

La photométrie a pour objet la détermination de l'intensité lumineuse d'un foyer, en fonction de celle d'un autre foyer pris comme étalon. L'œil juge très mal du rapport de deux éclats ou de deux éclairements. D'après la loi psychophysique de Fechner, l'intensité de la sensation croît, non pas proportionnellement à l'excitation, mais au logarithme de celle-ci. Il en résulte qu'on ne

peut arriver à quelque exactitude dans les mesures qu'en ramenant l'opération à la constatation de l'égalité de deux éclairements. Le plus souvent, on éclaire deux écrans semblables, sous des incidences égales, par les deux sources à comparer et l'on modifie les distances de celles-ci aux écrans jusqu'à ce que les éclairements obtenus, considérés sous des angles égaux, paraissent identiques.

En vertu des relations précédentes, on a, en appelant I et I′ les intensités lumineuses, et R et R′ les distances,

$$\frac{I}{R^2} = \frac{I'}{R'^2}.$$

Le rapport des intensités est donc égal au rapport des carrés des distances correspondantes.

Comme, en général, les distances des sources lumineuses aux écrans sont grandes relativement aux dimensions des foyers, on peut considérer les sources comme punctiformes, sauf lorsqu'elles sont entourées de globes lumineux de grande surface. On peut cependant négliger l'erreur résultant de la simple application de la loi des carrés si la distance est au moins égale à dix fois la plus grande dimension du globe. M. Broca a montré qu'on juge le mieux de l'égalité de deux éclairements lorsque ceux-ci sont voisins de 10 lux, l'œil de l'observateur étant à environ 30 cm des écrans observés. Cette remarque renseigne sur la distance à laquelle il faut placer l'étalon du photomètre, pour que celui-ci fournisse les résultats les plus précis. L'éclairement des écrans devrait être spécifié avec les résultats des observations photométriques pour permettre d'apprécier les conditions dans lesquelles celles-ci ont eu lieu.

Il faut tenir compte dans les mesures photométriques de ce fait que les deux yeux ne subissent généralement pas à des degrés égaux les impressions lumineuses. Si l'on éclaire également les deux moitiés d'un écran translucide par des foyers identiques séparés par une cloison et situés à la même distance de l'écran, et si l'on regarde chaque moitié avec un œil, ce qui peut se faire en prolongeant en avant de l'écran la cloison découpée suivant le profil de la figure, les yeux jugent en général que les deux moitiés sont inégalement éclairées. Pour éprouver avec les deux yeux la même impression lumineuse, il est nécessaire de reculer l'un des foyers

jusqu'à réduire, souvent de plus de $^1/_{10}$, l'éclairement correspondant. Il s'ensuit qu'il est indispensable dans les mesures de placer les deux yeux de manière qu'ils voient à la fois les deux plages éclairées et que les rayons leur arrivent de ces plages sous des inclinaisons égales. Si ces conditions ne sont pas réalisables, il faut ne se servir que d'un œil pour l'observation, bien que la sensibilité soit alors notablement diminuée. Si les inclinaisons sont très peu différentes, on peut corriger l'erreur commise de ce chef, en intervertissant la position des foyers et en prenant des moyennes, ou mieux encore, en se servant d'une source lumineuse auxiliaire qu'on compare successivement à l'étalon et au foyer inconnu, suivant le principe de la double pesée.

Lorsque les yeux fixent pendant quelque temps des plages éclairées, ils éprouvent une fatigue qui diminue leur sensibilité. Pour que l'œil saisisse le mieux possible le moment où les éclairements des deux plages sont égaux, il faut déplacer rapidement l'un des foyers comparés et déterminer les positions limites pour lesquelles l'œil perçoit une différence dans les éclairements. On adopte la position moyenne dans le calcul des intensités.

En prenant toutes les précautions indiquées, à savoir : éclairement des écrans d'environ 10 lux, vision binoculaire ou monoculaire des plages sous des incidences égales, distance de 30 cm entre les yeux et les plages éclairées, à moins qu'on ne se serve de lunettes de visée, déplacement d'un des foyers de manière à laisser aux yeux toute leur sensibilité; il n'est pas rare d'observer des différences de 0,7 à 1 pour 100 entre les résultats de divers observateurs, ce qui montre qu'en photométrie l'erreur personnelle a une influence plus grande que dans les mesures électriques. La photométrie tient, en effet, plus de la physiologie que de la physique, les phénomènes compliqués d'adaptation de l'œil faisant de celui-ci un instrument de mesure imparfait.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que les deux foyers comparés sont de même nature, c'est à dire de même teinte ou de même composition spectrale. Théoriquement la comparaison des éclairements n'est possible que dans ces conditions. S'il n'en est pas ainsi et si l'un des foyers est, par exemple, plus riche en rayons rouges, l'autre en rayons bleus, les éclairements ne sont

plus comparables et la mesure devient une affaire d'appréciation personnelle, où les phénomènes de daltonisme conduisent à des résultats très inégaux suivant les observateurs, les yeux des diverses personnes étant différemment impressionnés par les couleurs.

De plus, la loi des distances ne s'applique pas rigoureusement à des foyers inégalement colorés. Ce fait, découvert par Purkinje, peut se démontrer de la manière suivante. Deux lampes à incandescence semblables éclairent deux écrans, l'une a travers un verre rouge, l'autre à travers un verre vert. On règle les distances des lampes de manière que les éclairements paraissent égaux. Si l'on réduit ou si l'on augmente les intensités des foyers dans la même proportion, en affaiblissant ou en accroissant le courant qui traverse les lampes, les deux éclairements sont jugés inégaux.

Comme le cas de la comparaison des foyers de teintes différentes, arc voltaïque et Carcel par exemple, se présente constamment dans la pratique, il est nécessaire de recourir à divers artifices pour éviter de trop grandes inexactitudes dans les mesures. Le moyen le plus rigoureux consiste à décomposer les faisceaux émis par les foyers à l'aide du prisme et à comparer séparément les rayons de même couleur, pris deux à deux ; mais cette opération, qui fait l'objet de la spectrophotométrie, n'est pas appliquée par les praticiens à cause de sa complexité.

MM. Nichols et Crova ont remarqué que l'égalité des éclairements moyens, fournis par des foyers hétérogènes, correspond à l'égalité des éclairements réalisés par des rayons d'une longueur d'onde déterminée. M. Nichols a indiqué la longueur d'onde $\lambda = 600$ microns. M. Crova a trouvé que cette longueur d'onde critique est $\lambda = 582$ microns. M. Crova a, en outre, indiqué un procédé propre à obtenir ces rayons à l'exclusion des autres. Il suffit d'interposer, entre l'œil et l'écran éclairé, une cuve en verre contenant une épaisseur de 5 mm d'une solution de 22,3 gr. de perchlorure de fer et de 27,2 gr. de chlorure de nickel cristallisé, dissous dans l'eau distillée de manière à former un volume de 100 cm^3 à 15° C. La solution est saturée de chlore pour assurer la conservation du liquide. Ce procédé supprime la nécessité de photométrer séparément les divers rayons du spectre et permet

de déterminer directement le rapport des intensités lumineuses de deux sources de teintes différentes. Néanmoins, il a encore été trouvé trop complexe par les praticiens. Plus simplement, on peut utiliser un verre vert ne laissant passer que les rayons de longueur d'onde 582.

Le moyen le plus communément employé consiste à faire exécuter plusieurs mesures par des observateurs différents et à prendre des moyennes. On a soin de déplacer brusquement l'un des foyers entre des positions limites qu'on resserre de plus en plus, car l'œil perçoit plus nettement l'égalité d'éclairement lorsque les variations sont rapides que lorsqu'elles s'accomplissent lentement.

Enfin, si les teintes des lumières sont par trop différentes, on peut recourir aux artifices suivants.

On observe les écrans en clignant les yeux. Ce procédé, très employé par les peintres pour différencier les valeurs des éclairements, a pour effet de réduire la quantité de lumière qui entre dans l'œil et, par suite, d'éliminer la sensation colorée qui exige un certain degré d'excitation de la rétine.

Un autre moyen consiste à tracer sur les écrans éclairés par les deux sources une série de dessins décroissants et à faire varier la distance des foyers jusqu'à ce que le dessin le plus petit qu'on puisse percevoir ait la même grandeur sur les deux écrans. L'approximation obtenue par ce procédé dépend du nombre de dessins décroissants, ainsi que de l'acuité visuelle de l'observateur.

Méthodes photométriques. — La plupart des photomètres usuels sont basés sur la loi des distances. Les deux moitiés d'un écran sont éclairées, par réflexion ou par transparence, sous des incidences égales par les deux sources à comparer. On déplace celles-ci jusqu'à ce que les éclairements qu'elles produisent soient égaux et l'on applique la formule

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}. \qquad (1)$$

La mesure doit se faire dans une chambre à parois d'un noir mat, afin d'éviter les reflets sur l'écran. Le cube de la chambre doit être assez grand, parce que les étalons à flamme sont altérés par

l'air vicié. Il faut que, pendant les mesures, les sources ne puissent être vues directement par l'observateur. Celui-ci fait, à cet effet, usage d'une grande visière noire, recourbée sur les côtés et ne donnant accès qu'aux rayons issus de l'écran.

Lorsque les foyers à comparer sont très inégaux, on peut reculer l'un d'eux à une grande distance de l'écran, mais ce système n'est pas sans inconvénient, car il exige des couloirs photométriques étendus et les poussières flottant dans l'atmosphère du laboratoire absorbent une notable fraction du faisceau lumineux. On peut aussi rapprocher la lampe étalon de l'écran, mais il est à craindre que l'éclairement de ce dernier cesse d'être uniforme ou dépasse trop l'éclairement de 10 lux avec lequel la comparaison atteint la plus grande précision.

On tourne ces difficultés en employant une source lumineuse d'intensité intermédiaire, qu'on compare aux lampes étudiées. Comme étalons intermédiaires, on utilise soit de fortes lampes à pétrole ou à gaz, soit des lampes à incandescence.

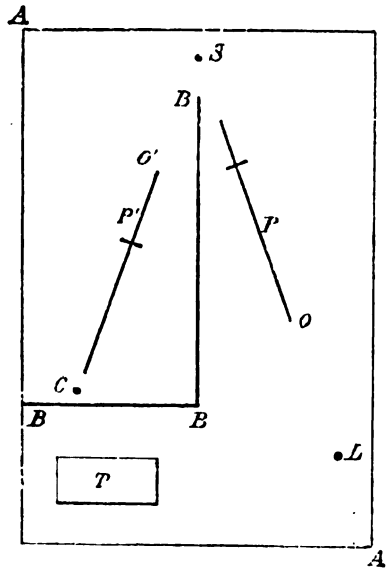


Fig. 19.

La figure 19 montre le plan d'une chambre noire A A, dans laquelle deux bancs photométriques P et P′ sont séparés par une

cloison B. Les lumières à comparer sont disposées en L et en C, tandis que la source intermédiaire est placée en S. On peut ne se servir que d'un seul banc en comparant successivement l'étalon et la lampe inconnue à la source auxiliaire, ce qui élimine certaines erreurs comme on l'a vu au paragraphe précédent.

Une autre méthode, préconisée par MM. Ayrton et Perry, consiste à interposer, sur le faisceau émis par le foyer le plus intense, un diaphragme dans lequel se trouve une lentille divergente biconcave.

Si le foyer est à une distance l de la lentille, la divergence des rayons qui frappent l'écran est accrue comme si la source était au foyer conjugué et écartée de la lentille d'une distance l', telle que

$$\frac{1}{l'}-\frac{1}{l}=\frac{1}{f}; \quad (2)$$

f étant la distance focale principale de la lentille.

Par suite,

$$l'=\frac{lf}{l+f}.$$

Désignons par ρ le rayon du cercle éclairé sur l'écran lorsque le faisceau traverse le diaphragme sans lentille, et par ρ' le rayon du cercle agrandi par l'interposition de la lentille dans le diaphragme.

Le rayon de celui-ci étant r et sa distance à l'écran δ, on a

$$\frac{\rho}{r}=\frac{l+\delta}{l},$$

$$\frac{\rho'}{r}=\frac{l'+\delta}{l'};$$

d'où

$$\frac{\rho'}{\rho}=\frac{l\,(l'+\delta)}{l'\,(l+\delta)}$$

et, en remplaçant l' par sa valeur,

$$\frac{\rho'}{\rho}=1+\frac{\delta\, l}{f\,(l+\delta)}.$$

Or, les éclairements produits sans et avec interposition de la lentille sont dans le rapport

$$\left(\frac{\rho'}{\rho}\right)^2=\left[1+\frac{\delta\, l}{f\,(l+\delta)}\right]^2.$$

Il faut donc, dans l'expression de la loi des distances, introduire, au lieu de la distance

$$d = l + \delta,$$

la distance virtuelle

$$d_1 = \frac{\rho'}{\rho}(l + \delta) = l + \delta + \frac{\delta l}{f};$$

mais, comme

$$l = d - \delta,$$

$$d_1 = d + \frac{\delta(d - \delta)}{f}.$$

La formule (1) devient alors

$$\frac{I}{I'} = \frac{\left[d + \frac{\delta(d - \delta)}{f}\right]^2}{d'^2}. \qquad (3)$$

La lentille exerce son plus grand effet quand $\delta = \frac{1}{2}d$.

Pour déterminer la distance focale f, on emploie deux sources identiques, telles que deux lampes à incandescence. On dispose la première lampe à la division o du banc photométrique, l'écran à la division d et la seconde lampe à la division $2d$ qui donne l'égalité des éclairements. On introduit ensuite la lentille à la division $\frac{d}{2}$; il faut alors écarter la lampe mobile à une distance d' de l'écran pour revenir à l'égalité. En appliquant la formule (3), il vient

$$f = \frac{d^2}{4(d' - d)}.$$

Il est à remarquer que, dans ces formules, on a négligé les réflexions à la surface de la lentille, qui dépassent souvent 5 pour 100 de la lumière incidente. Pour compenser cette perte, on place symétriquement de l'autre côté du photomètre une simple plaque de verre qui amène une perte sensiblement égale.

Degré d'incandescence. — Quand on veut spécifier la qualité de la lumière fournie par les sources lumineuses, on adopte la définition suivante, proposée par M. Crova et acceptée par le Congrès des Électriciens de 1889. Le *degré d'incandescence* d'un foyer est le quotient des intensités des radiations de longueurs d'onde $\lambda = 582$ (vert) et $\lambda = 657$ (rouge). Pour déterminer ce

rapport, la lampe est comparée à un étalon et l'on place devant l'œil une cuve remplie, sous une épaisseur de 5 mm, de la solution de chlorures de nickel et de fer déjà mentionnée : soit a l'intensité de la lampe dans ces conditions. La même mesure est répétée après avoir placé devant l'œil un verre rouge qui laisse passer les rayons de longueur d'onde $\lambda = 657$: soit b l'intensité de la lampe dans ces nouvelles conditions. Le rapport $\frac{a}{b}$ est le degré d'incandescence.

Photomètre Foucault. — Cet appareil comporte un écran en verre laiteux ou dépoli E, derrière lequel se placent les deux foyers à comparer A et B, séparés par une cloison C normale à l'écran et divisant l'angle B E A en parties égales ; la cloison est légèrement écartée de l'écran, de manière que les plages lumineuses correspondant aux deux sources soient limitées par une mince ligne d'ombre projetée par la cloison. On déplace l'un des foyers,

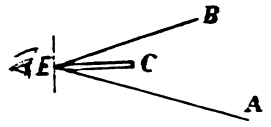


Fig. 20.

suivant la direction du rayon incident, jusqu'à ce que les éclairements des deux moitiés de l'écran paraissent égaux pour l'œil placé suivant la ligne E C à 30 cm de l'écran. On a soin d'observer les diverses précautions indiquées précédemment, pour réduire l'erreur d'observation au minimum. Il suffit alors d'appliquer la loi des distances aux deux sources de lumière.

Photomètre Lambert et Rumford. — Dans le photomètre Lambert et Rumford, les deux foyers à comparer sont placés du même

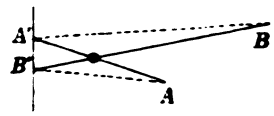


Fig. 21.

côté d'un écran blanc opaque, sur lequel une tige porte deux ombres A′ et B′, éclairées chacune par le foyer situé du

même côté. On a soin de rendre égales les incidences des deux rayons A A′ et B B′, ce qui est facile si la tige est assez rapprochée de l'écran pour que les deux ombres se touchent. On écarte l'un des foyers jusqu'à ce que les ombres paraissent également éclairées et l'on applique la loi fondamentale aux distances A′ B et A B′.

Photomètre Villarceau. — Sur une droite passant par les deux foyers à comparer, on dispose un écran présentant deux faces blanches à angle droit, qui réfléchissent les faisceaux incidents vers l'observateur. Le réglage des distances a pour but d'égaliser les

Fig. 22.

éclairements des deux faces. Ce photomètre, qui a été repris par MM. S. Thompson et Starling, peut, pour des mesures grossières, se réduire à une carte de visite pliée et tournée de manière que le plan bissecteur soit normal à la ligne des foyers.

Photomètre Bunsen. — Le photomètre Bunsen repose sur cette observation qu'une tache d'huile faite sur une feuille de papier paraît brillante si le papier est éclairé par transparence, et sombre

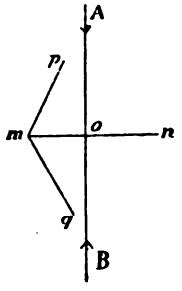


Fig. 23.

si le papier est éclairé par réflexion. Si la feuille reçoit des quantités de lumière égales sur les deux faces, la tache se confond avec le papier.

Si l'on dispose les deux foyers à comparer en A et B, la tache O semble disparaître lorsque les intensités lumineuses satisfont à la loi des distances. Pour observer simultanément les deux faces de l'écran, on fait usage de miroirs plans mp et mq qui réfléchissent ces faces vers le spectateur. La disparition de la tache tient à ce que la somme des flux lumineux que le papier émet par transparence et par réflexion est égale au flux total correspondant que fournit la tache. Comme les coefficients de reflexion des deux faces de l'écran ne sont jamais identiques, la disparition de la maculature n'a pas lieu des deux côtés à la fois. On détermine par tâtonnements la position pour laquelle la tache a la même apparence sur les deux faces du papier et l'on applique la loi des distances à cette position. Si l'on veut une exactitude plus grande, on retourne l'écran pour recommencer l'opération et l'on prend la moyenne des résultats obtenus dans les deux mesures. Le photomètre et les foyers comparés se placent sur un banc photométrique divisé en cm de manière à renseigner directement les distances.

Pour préparer l'écran, on plonge un disque de laiton chauffé dans un bain de paraffine et l'on applique le disque sur une feuille de papier tendue. On fait ainsi un certain nombre de taches et l'on choisit la partie du papier qui contient la meilleure. On enlève l'excès de paraffine en étendant sur l'écran un papier buvard qu'on recouvre d'un fer légèrement chauffé. On peut substituer à cet écran deux feuilles de papier accolées dans lesquelles on a percé des trous correspondants et entre lesquelles se trouve une feuille de papier translucide qui remplace la maculature.

Photomètre Joly. — Deux lames parallélipipédiques de paraffine sont accolées et disposées sur le banc photométrique entre les foyers à comparer, de manière que la surface de contact soit normale à la ligne qui joint ceux-ci. En faisant varier la distance de l'un des foyers à l'appareil, on constate que l'une des lames devient alternativement plus claire et plus sombre que la lame voisine. Au moment de l'égalité d'éclat des lames, la ligne de séparation disparaît. C'est la position qui correspond à l'égalité des éclairements. On fait une seconde mesure après avoir retourné l'écran pour compenser l'inégalité éventuelle des deux lames.

La fig. 24 montre un photomètre construit par MM. Hartmann et Braun, dans lequel un écran de Joly peut glisser dans un canal entre deux lanternes où l'on place les deux lampes à incandescence

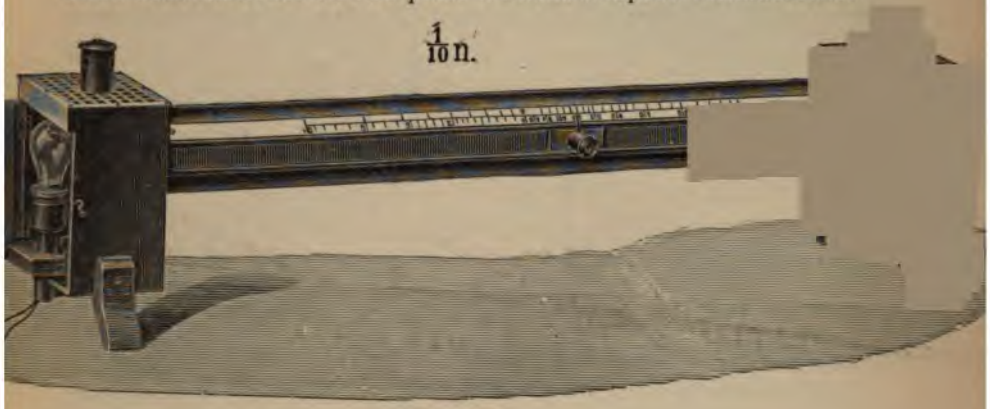


Fig. 24.

à l'étude. Ce dispositif, très simple, permet de comparer les intensités horizontales de deux lampes, dont l'une sert d'étalon, sans qu'il soit nécessaire de se placer dans une chambre noire.

Photomètre Lummer et Brodhun. — L'appareil renferme deux prismes à réflexion totale M et N. Le premier présente une face sphérique dans laquelle on a usé un plan circulaire appuyé, par l'intermédiaire de baume de Canada, sur la face hypothénuse plane du second prisme. Un écran opaque E est éclairé normalement sur ses deux faces par les foyers à comparer *b* et *l*. Les rayons émis par la face de gauche arrivent, après réflexion sur le miroir *m*, sur le prisme M : une partie traverse sans réflexion ni réfraction la surface de séparation des deux prismes et vient frapper l'œil placé devant l'oculaire O. L'observateur perçoit ainsi, sous forme d'une plage elliptique, une partie de la face gauche de l'écran. En même temps, l'œil distingue un champ lumineux entourant le premier et provenant de la lumière émise par la face droite de l'écran, lumière réfléchie sur le miroir *m'* et dont une partie subit la réflexion totale sur la face hypothénuse du prisme N, là où celui-ci n'est pas en contact avec M. On règle les distances des foyers à l'écran de manière à obtenir l'égalité d'éclairement des deux champs. L'appareil permet

le retournement de l'ecran, pour eliminer l'influence de l'inégalité des faces de celui-ci. C'est un des photometres les plus sensibles connus.

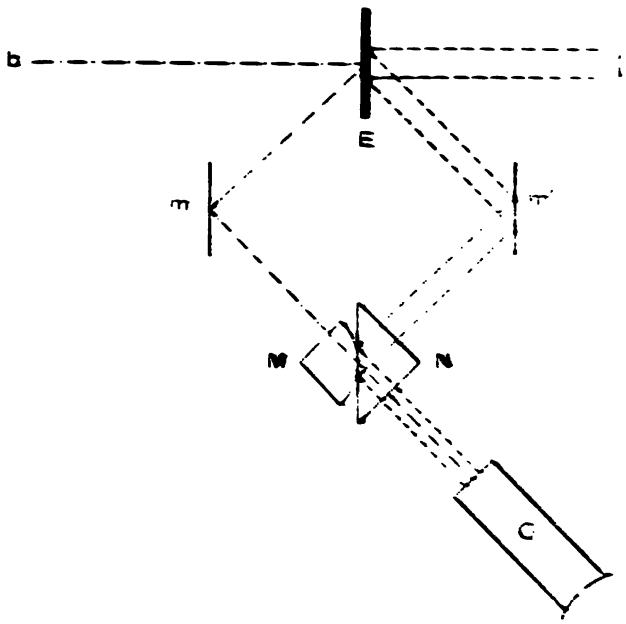


Fig. 25.

Intensité moyenne sphérique. — L'intensité lumineuse d'un foyer n'est pas la même dans les diverses directions : la flamme d'une bougie, par exemple, emet des rayons plus intenses dans les directions horizontales que dans les directions obliques par rapport a l'horizon. Or, la valeur d'un foyer depend, dans certaines circonstances, de l'eclairement moyen qu'il peut produire, en sorte qu'il est interessant d'evaluer l'intensite lumineuse, rapportee a l'etalon, non seulement suivant une direction horizontale, mais encore dans les divers azimuts et sous diverses inclinaisons, l'intensite de la lampe étalon etant considerée suivant une direction invariable.

On arrive a ce resultat en disposant l'ecran photométrique de iere qu'il soit frappe sous des incidences egales par les rayons nt des deux lumieres a comparer, quelle que soit la position

du foyer étudié. On construit, à cet effet, des photomètres Bunsen mobiles autour de l'axe *m* (fig. 26), et portant en saillie des boutons *a* et *b* dont les ombres se superposent sur l'écran lorsque celui-ci est orienté suivant la bissectrice des faisceaux incidents.

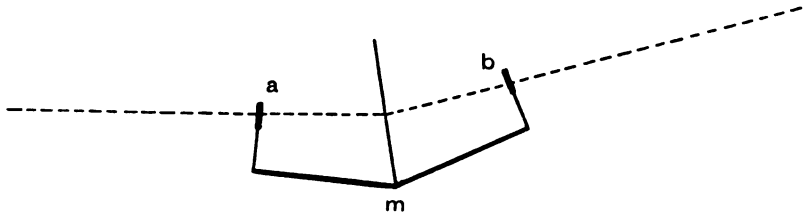


Fig. 26.

Un moyen indirect, qui permet d'utiliser les photomètres ordinaires, consiste à disposer sur le banc photométrique un miroir mobile, susceptible de renvoyer vers l'écran le flux lumineux qu'il reçoit de la lampe essayée, quel que soit l'angle de ce dernier avec l'horizontale. On compare l'éclairement de l'écran par le faisceau réfléchi à l'éclairement dû à la lampe étalon, dans diverses positions de la lampe à l'essai. On note l'inclinaison des rayons reçus sur l'écran, ainsi que leur parcours total et l'on applique la loi des distances, en tenant compte du coefficient d'absorption du miroir, qui est à peu près indépendant de l'incidence.

Pour déterminer le coefficient d'absorption, on compare à une lampe étalon une autre lampe placée d'abord sur la même ligne que l'étalon et le photomètre, le miroir étant enlevé ; on dispose ensuite la lampe de manière que les rayons arrivant normalement au banc photométrique soient réfléchis par le miroir disposé à 45°. Soient l et l' les distances, parcourues par les faisceaux incidents de la lampe, correspondant à la même position de l'étalon. En appelant I l'intensité de la lampe et k le coefficient d'absorption, on a

$$\frac{I(1-k)}{I} = \frac{l'^2}{l^2};$$

d'où

$$k = 1 - \frac{l'^2}{l^2}.$$

Ce coefficient varie de 0,6 à 0,9 suivant la nature des miroirs

On maintient constante la distance de la lampe au miroir, pour ne pas avoir à mesurer cette distance à chaque expérience. On utilise, dans ce but, le procédé suivant. La lampe F est suspendue à l'une des extrémités d'un levier BA pivotant sur une genouillère

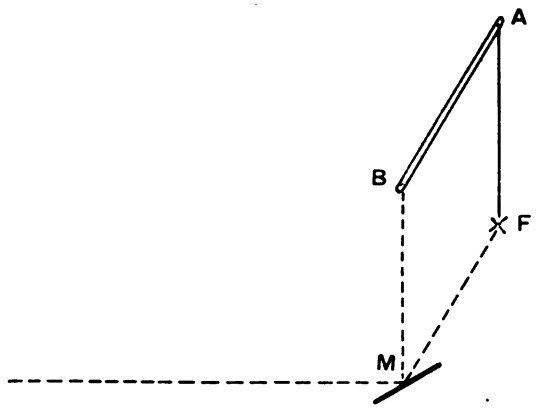


Fig. 27.

à l'autre extrémité située sur la verticale passant par le miroir M. La distance de l'axe de rotation B au miroir est égale à la longueur de la corde qui soutient le foyer. Dans ces conditions, quelle que soit la position donnée au foyer, la distance de celui-ci au miroir reste constante et égale à BA.

Photomètre Rousseau. — Les méthodes ci-dessus exigent que la lampe essayée conserve une intensité lumineuse invariable pendant les mesures successives, sinon les résultats obtenus ne sont pas comparables entr'eux. Or, la lumière des lampes à arc, auxquelles on applique particulièrement ce mode d'investigation, est instable. M. Rousseau a admis que, lors des variations de l'arc, les intensités dans les diverses directions conservent les mêmes valeurs relatives, et il a réalisé un photomètre au moyen duquel on compare l'intensité de la lumière émise sous divers angles à l'intensité des rayons émis par la même lampe dans une direction déterminée, telle que celle d'intensité maxima.

La lampe est suspendue derrière un disque opaque portant sur sa face antérieure une graduation en 360 degrés. Autour du disque se meuvent deux alidades radiales, munies de miroirs N, M et de

tiges métalliques *n*, *m*, destinées à porter ombre sur un écran DC. Ce dernier est fixé normalement à une coulisse H que deux tringles articulées K H et I H maintiennent suivant la bissectrice de l'angle des alidades. Dans le cas de lampes à arc alimentées par un cou-

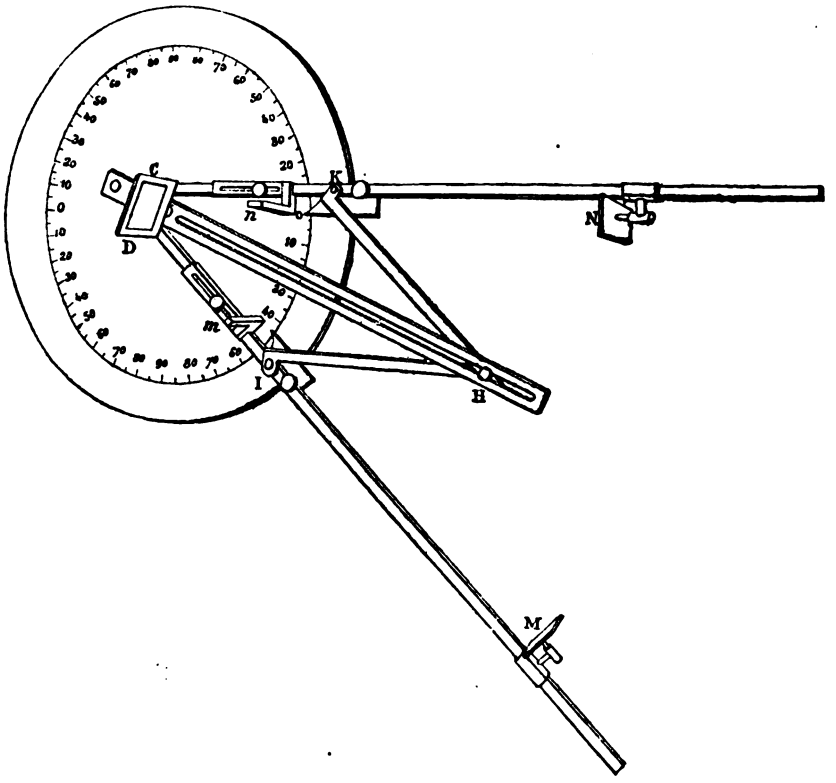


Fig. 28.

rant continu, l'une des alidades est disposée suivant la direction à 45° sous l'horizontale, l'autre suivant la direction à laquelle correspond l'intensité relative cherchée. On tourne les miroirs M et N, articulés sur des genouillères, de manière qu'ils réfléchissent la lumière de la lampe sur l'écran DC. Les incidences des rayons sur l'écran sont égales par le fait de la disposition adoptée. Les deux tiges *m* et *n* portent sur celui-ci deux ombres; l'ombre produite par un des faisceaux est éclairée par l'autre faisceau. On

déplace les miroirs sur les alidades jusqu'à ce que les ombres paraissent de même intensité. Si alors d et d' représentent le double des distances de chacun des miroirs à l'écran, on a, en appelant i et i' les intensités des faisceaux comparés,

$$\frac{i}{i'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Lorsqu'on étudie une lampe à arc à l'aide de cet appareil, les deux ombres présentent des teintes différentes, alors même que les miroirs sont identiques. Cela tient à ce que la composition spectrale des rayons n'est pas la même sous les diverses inclinaisons, par suite de l'hétérogénéité des parties lumineuses du foyer.

La comparaison, sous une direction unique, de la lampe étudiée avec une lampe étalon fournit la valeur absolue des intensités suivant les diverses directions.

Détermination de l'intensité moyenne sphérique. — Si l'on

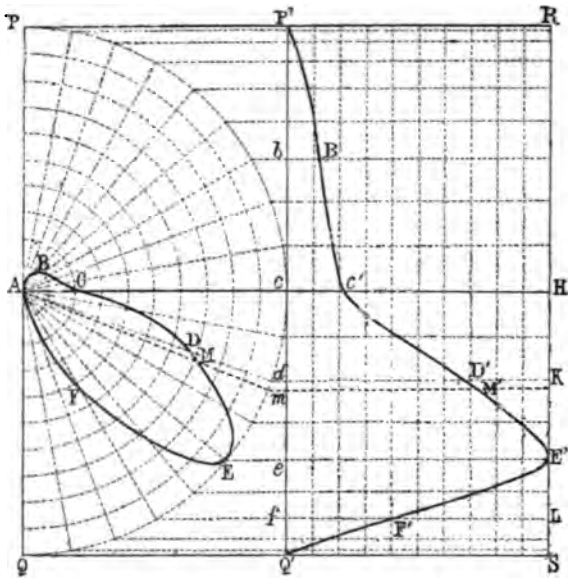


Fig. 29.

porte suivant les diverses directions prises dans un azimut, à partir d'un point A (fig. 29), des longueurs proportionnelles aux

intensités lumineuses correspondant à ces directions, l'intensité maxima AE étant représentée par l'unité de longueur, on obtient, pour un arc voltaïque à courant continu, une courbe telle que ABCDEF. Pour une lampe qui rayonne également dans les divers azimuts, la surface obtenue en portant des longueurs semblables sur toutes les directions passant par le point A est une surface de révolution dont la courbe figurée est une section méridienne.

M. Rousseau représente la répartition de l'éclairage comme le montre le côté droit de la figure. Des longueurs proportionnelles aux diverses intensités sont portées normalement à une droite P'Q' sur les abscisses correspondant aux extrémités des rayons de la circonférence de centre A. On peut démontrer que l'intensité moyenne sphérique du foyer, c'est à dire la moyenne des intensités obtenues dans les diverses directions considérées autour du point A, est à l'intensité maxima AE comme la surface P'B'C'D'E'F'Q' est à la surface du rectangle P'RSQ'. Soit, en effet, i l'intensité suivant une direction AD faisant un angle α avec l'horizontale. La zone sphérique correspondant à deux rayons infiniment voisins AD et AM a une surface $2\pi\cos\alpha d\alpha$, le rayon de la sphère étant l'unité. Le flux lumineux qu'elle reçoit est $2\pi i\cos\alpha d\alpha$.

L'éclairement moyen de la zone limitée par deux rayons AD et AF, faisant des angles α et α' avec l'horizontale, s'obtient en divisant le flux,

$$\int_{\alpha}^{\alpha'} 2\pi i\cos\alpha d\alpha,$$

par la surface de la zone correspondante,

$$2\pi(\sin\alpha' - \sin\alpha).$$

Mais, d'après la construction de la figure, la surface F'fdD'E' représente la valeur de l'intégrale

$$\int_{\alpha}^{\alpha'} i\cos\alpha d\alpha,$$

et, comme le rectangle dKLf a pour hauteur l'unité, il est mesuré par sa base

$$fd = \sin\alpha' - \sin\alpha.$$

L'intensité lumineuse moyenne dans la zone considérée est donc

$$\frac{\text{surf. } d\text{D'E'F'}f}{\text{surf. } d\text{KL}f}.$$

L'éclairement moyen de la sphère entière est donné par le rapport de l'aire curviligne totale à l'aire rectangulaire qui la circonscrit. Par conséquent, pour calculer l'intensité moyenne sphérique en fonction de l'intensité maxima, il suffit d'évaluer les deux surfaces en se servant du planimètre.

Pour les lampes à arc à courant continu, on mesure les intensités lumineuses de 10° en 10° sous l'horizon et de 30° en 30° au dessus. M. Rousseau a reconnu, en ce qui concerne ces lampes, que l'intensité horizontale varie dans les divers azimuts, par suite de l'obliquité que présente fréquemment le cratère; mais l'intensité maxima, correspondant à un angle d'environ 45° sous l'horizon, est approximativement constante dans tous les plans verticaux passant par le foyer.

Le flux lumineux total émis par un foyer est le produit de 4π par l'intensité moyenne sphérique. Une lampe de 300 pyrs (moyenne sphérique) fournit 3770 lumens.

Lumen-mètre de M. Blondel. — L'intensité moyenne sphérique d'un foyer ayant pour expression le quotient du flux lumineux total émis par 4π, il s'ensuit qu'une méthode qui permet de mesurer ce flux donne indirectement l'intensité cherchée. M. Blondel a imaginé de réfléchir sur un écran diffuseur, à l'aide d'un miroir concave, une fraction connue du flux rayonné par la lampe. Cet écran présente ainsi une image brillante qu'on photomètre par les méthodes ordinaires. L'appareil, étalonné à l'aide d'une lampe d'intensité connue, permet de déduire l'intensité moyenne sphérique d'une seule mesure.

Dans un récent modèle du lumen-mètre de M. Blondel la source étudiée est disposée au centre d'une sphère opaque, noircie intérieurement et percée de deux ouvertures en forme de fuseaux. Les deux flux de lumière qui sortent par ces fenêtres frappent un miroir concave qui les réfléchit sur l'écran diffuseur en une image de petites dimensions. Le flux traversant les fuseaux représente le

$^1/_{10}$ du flux total Si la lumière étudiée éclaire également dans tous les azimuts, une seule expérience suffit; sinon l'on répète la mesure en faisant tourner le foyer au centre de la sphère.

Courbes d'éclairement. — Les méthodes photométriques étudiées jusqu'à présent ne s'appliquent pas à la mesure directe de la répartition de l'éclairement fourni par un foyer dans une salle ou dans un espace découvert. Pour ce dernier cas, le calcul permet d'arriver à la solution, lorsqu'on connaît l'intensité des rayons émis par les foyers suivant les diverses directions et qu'il n'existe aucune paroi réfléchissante ni diffusante. Ainsi, l'éclairement produit par un rayon lumineux d'intensité I pyrs sur une surface distante de r mètres est, en appelant α l'angle d'incidence,

$$\frac{I \cos \alpha}{r^2} \text{ lux.}$$

Supposons qu'on ait calculé d'après cette formule la répartition sur un plan horizontal de l'éclairement fourni par un foyer. On pourra représenter la distribution de la lumière dans un plan vertical passant par la lampe, en prenant comme abscisses les distances au pied du foyer et comme ordonnées les valeurs de l'éclairement. S'il y a plusieurs foyers en ligne droite, on construira la courbe d'éclairement pour chaque foyer et, en additionnant les ordonnées correspondant à une même abscisse, on déterminera les ordonnées de la courbe d'éclairement résultante.

Voici un autre procédé graphique, emprunté au système des projections cotées, et applicable à des foyers distribués d'une manière quelconque au-dessus du plan horizontal, par exemple aux réverbères éclairant une place publique. Sur un plan de la surface éclairée, on indique la position des sources lumineuses et l'on trace autour de celles-ci des circonférences concentriques, représentant les lieux des points d'égal éclairement relatifs aux foyers considérés isolément. En additionnant, en un nombre de points suffisant, les cotes d'éclairement qui se rapportent aux diverses lampes, il est possible de tracer les courbes d'égal éclairement relatives à l'ensemble des foyers.

Ces procédés ne sont pas exacts lorsqu'il existe des surfaces réfléchissantes, dans une salle par exemple; il faut alors recourir à la mesure directe de l'éclairement.

Pour évaluer l'éclairement utile moyen d'une surface horizontale éclairée par des lampes à arc, on photomètre une des lampes et l'on détermine le flux envoyé sous l'horizon en planimétrant la partie correspondante de la courbe Rousseau. Le produit de ce flux, en lumens, par le nombre de lampes, divisé par l'aire de la surface en m^2 donne l'éclairement moyen en lux.

Photomètre L. Weber. — Le photomètre suivant permet de mesurer directement l'éclairement d'une surface. L'appareil comprend deux tubes A et B noircis intérieurement. Le premier est fixé horizontalement sur un pied; le second est mobile autour de l'axe de A et peut être incliné dans toutes les directions par rapport à l'horizon. Le tube A se termine par une lanterne pourvue d'une lampe auxiliaire, laquelle envoie un faisceau lumineux divergent

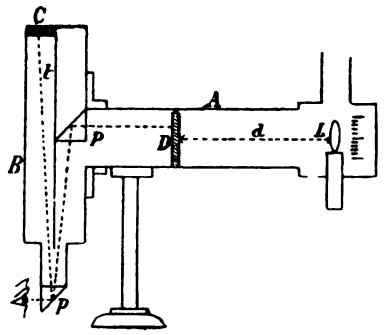


Fig. 30.

sur une plaque laiteuse D, qu'on peut mouvoir suivant l'axe du tube à l'aide d'une crémaillère et d'un bouton extérieur. La hauteur de la flamme de la lampe se lit sur une échelle, à travers une fenêtre allongée, percée dans la paroi de la lanterne. Le tube B, fermé par une plaque laiteuse C, est divisé en deux parties par une cloison *t*. La plaque C est disposée suivant le plan dans lequel on veut mesurer l'éclairement, par exemple, dans le plan horizontal, comme l'indique la figure 30. En regardant à travers l'orifice *p*, directement ou par réflexion dans un prisme, on distingue une partie de la plaque C qu'éclaire, par transparence, la lumière d'un foyer ou la lumière diffuse ; en même

temps, on voit, par réflexion totale dans un prisme P, la plaque D éclairée, par transparence, par la lampe auxiliaire. En faisant varier la position de la plaque D, il arrive un moment où les deux plaques se détachent avec la même netteté, ce qui correspond à des éclairements égaux. Or, l'éclairement de la plaque D est, en appelant d sa distance à la lampe auxiliaire d'intensité égale à i,

$$\frac{i}{d^2}.$$

Vu la distance de la lampe à la plaque, on ne commet pas d'erreur sensible en admettant que l'éclairement de cette dernière est uniforme. L'éclairement de la plaque C est exprimé également par $\frac{i}{d^2}$. Pour déterminer i, on vise avec le tube mobile une lampe étalon placée à une distance déterminée de la plaque C et l'on cherche la position correspondante de la plaque D. Lorsque les lumières à comparer sont d'intensités très différentes, on peut employer des plaques plus ou moins absorbantes, qu'on a soin d'étalonner de même en plaçant devant le tube B, à une distance connue, un foyer étalon.

L'appareil de Weber permet de photométrer les foyers de grandes dimensions, tels que les lampes à arc pourvues de globes laiteux, qui s'étudient difficilement avec quelques uns des photomètres décrits précédemment. A cet effet, on oriente le tube B vers le foyer, de manière que la plaque terminale soit frappée directement par les rayons émanant de la source.

On peut aussi mesurer les éclairements en enlevant la plaque laiteuse C et en visant normalement un écran blanc placé dans le plan dont on cherche l'éclairement. On étalonne alors l'appareil en éclairant l'écran par une source lumineuse connue placée à une distance déterminée, par exemple par une bougie de l'intensité d'un pyr disposée à un mètre, ce qui équivaut à un éclairement d'un lux.

Si les deux lumières sont de colorations très différentes, il est difficile de comparer les éclairements des deux plaques. On a alors recours à l'artifice suivant. On commence par remplacer les plaques laiteuses C et D par des plaques en verre dépoli portant une série de dessins décroissants. On place une lampe étalon à une distance L de C et l'on cherche la distance d dont il faut éloigner la plaque

D de la flamme de l'appareil pour voir un même dessin avec la même netteté. Les éclairements $\frac{I}{L^2}$ et $\frac{i}{d^2}$ sont alors égaux.

Si l'on remet ensuite les plaques laiteuses et si l'on regarde à travers un verre rouge, les deux éclairements ne semblent plus égaux; il faut donner à D une position d' pour rétablir l'équilibre. L'intensité de l'étalon n'a plus pour expression $\frac{i L^2}{d^2}$, mais elle est donnée avec le verre rouge par

$$\frac{i L^2}{d'^2} = \frac{1}{K} \frac{i L^2}{d^2}.$$

On tire de là la constante K par laquelle il faut multiplier l'intensité trouvée avec le verre rouge pour obtenir l'intensité réelle.

On peut arriver plus simplement au même résultat en interposant devant l'œil la solution isolant la longueur d'onde $\lambda = 582$ ou un verre vert équivalent.

Photomètre Mascart. — M. Mascart a imaginé un photomètre pour la mesure des éclairements dans lequel le réglage, au lieu de se faire par le déplacement d'une plaque laiteuse, comme dans l'appareil précédent, s'obtient par l'obturation plus ou moins complète d'une fenêtre traversée par le faisceau lumineux émis à travers la plaque laiteuse (fig. 31). La lampe auxiliaire L, dont la hauteur de

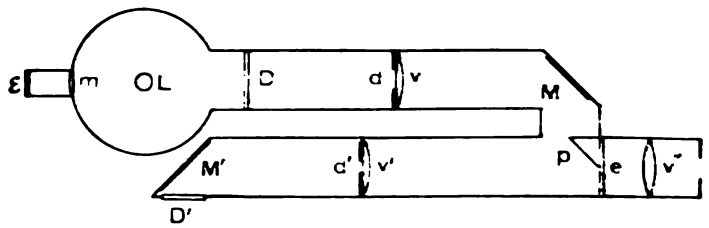


Fig. 31.

flamme se lit à l'aide de l'image projetée par une lentille *m* sur une échelle ε, envoie un faisceau lumineux sur une plaque laiteuse D. Celle-ci transmet à son tour un faisceau qui traverse le diaphragme réglable *d* fixé contre une lentille *v*; ce faisceau réfléchi par un miroir M et par un prisme *p* vient éclairer une partie de l'écran *e*. Ce dernier est vu nettement par l'œil, grâce à la lentille *v''* qui sert à la mise au point.

Une seconde plaque laiteuse D′, frappée normalement par la lumière de la lampe étalon ou disposée suivant la surface dont on cherche l'éclairement, transmet un faisceau lumineux, réfléchi par le miroir M′, à travers le diaphragme d' et la lentille v' sur l'autre moitié de l'écran e. On règle l'égalité d'éclat des deux plages lumineuses formées sur l'écran, en modifiant l'ouverture des diaphragmes d et d'.

Les éclats des deux plages peuvent être considérés comme proportionnels aux longueurs des ouvertures des diaphragmes, indiquées sur une petite graduation portée par les vis de réglage, la hauteur des fenêtres restant invariable.

Pour étalonner l'appareil, on dispose une lampe étalon à 1 m de l'écran D′, le faisceau lumineux tombant normalement sur celui-ci. L'éclairement Q ainsi réalisé est connu. On détermine les longueurs l et l' des diaphragmes d et d' qui donnent l'égalité d'éclat des images de D et de D′ sur e. En appelant P l'éclairement comparé à Q, on a

$$\frac{P}{Q} = \frac{l'}{l};$$

d'où

$$P = Q\,\frac{l'}{l}.$$

On procède de même pour comparer à P l'éclairement de la plaque D′ dû à une lumière quelconque.

Dans un modèle portatif du photomètre Mascart, les diaphragmes sont composés d'un disque percé de trous décroissants ; on fait ainsi varier l'éclairement des plages de l'écran par soubresauts, ce qui facilite le réglage.

Appareil Houston et Kennely. — Cet appareil permet d'apprécier rapidement, d'une manière approximative, l'éclairement en un point d'une salle ou d'un espace découvert illuminés par un nombre de foyers quelconque. Une petite chambre noire est éclairée par une fenêtre F formée d'une glace laiteuse, (fig. 32). En face de celle-ci se trouve un plan E portant des caractères imprimés qu'on regarde à l'aide d'une lunette L, à tirage pour la mise au point. La fenêtre F est placée dans le plan et à l'endroit dont on cherche

l'éclairement. A l'aide d'un pignon *p* et d'une crémaillère, on fait glisser un volet *v* pour réduire l'ouverture de la fenêtre jusqu'à la dernière limite de la vision distincte des caractères.

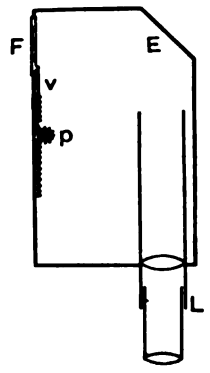


Fig. 32.

Le volet porte une graduation qui permet d'apprécier l'éclairement de la glace F. Cette graduation est obtenue en plaçant l'appareil dans une chambre noire devant un foyer étalon et en déterminant les positions du volet correspondant à différentes distances du foyer à la fenêtre. Les degrés de la graduation représentent des lux.

L'erreur moyenne des mesures peut atteindre 10 pour 100, mais l'appareil a l'avantage de ne pas exiger un étalon portatif et de permettre des mesures rapides d'une approximation suffisante pour beaucoup d'applications.

Rendement lumineux des lampes à incandescence. — On évalue l'intensité horizontale moyenne d'une lampe à incandescence en faisant la moyenne des lectures horizontales obtenues dans des azimuts différant de 22° $^1/_2$ ou de 45°. Le rapport entre l'intensité horizontale moyenne et l'intensité horizontale mesurée dans le plan du filament est voisin de 1,1 en général. Très souvent on adopte la moyenne horizontale comme terme de comparaison, afin d'abréger les essais. Cette manière de faire est légalisée en Angleterre. Elle concorde d'ailleurs avec la pratique suivie pour les foyers à flamme.

Si l'on veut déterminer l'intensité moyenne sphérique, on cherche, dans divers azimuts, la répartition de l'intensité lumi-

neuse suivant des rayons inclinés sur l'horizon. L'expérience montre que les courbes figurant la répartition de la lumière suivant les diverses sections horizontales faites dans la sphère d'éclairement sont semblables entr'elles et, par suite, semblables à la courbe obtenue dans le plan horizontal passant par le centre de figure de la lampe. Il suffit donc de déterminer la variation de l'intensité lumineuse dans un plan vertical et dans un plan horizontal passant par le centre de la lampe pour pouvoir calculer l'intensité moyenne sphérique de celle-ci.

Pour effectuer ces mesures, on se sert d'un des photomètres décrits précédemment. Afin de ne pas recourir à un miroir, on profite de la propriété que possèdent les lampes à incandescence de pouvoir fonctionner dans une position quelconque. On monte la lampe sur un support mobile autour d'un axe vertical, ce qui permet les observations propres à la détermination de la moyenne horizontale. Les positions de la lampe sont repérées par un index sur une graduation. En vue de la détermination de l'intensité moyenne sphérique, le système peut en outre tourner autour d'un axe horizontal passant par le centre de la lampe. Une seconde graduation repère les positions correspondantes de celle-ci.

Il est commode d'employer, pour les mesures de l'espèce, une lampe à incandescence à filament droit, servant d'étalon auxiliaire et graduée au préalable. Pour obtenir rapidement l'intensité horizontale moyenne, M. Crova a suggéré l'idée de donner à la lampe un mouvement rapide de rotation autour de son axe vertical pendant qu'elle est sur le banc photométrique. On détermine ainsi l'intensité du rayon moyen.

L'intensité lumineuse des lampes à incandescence dépend essentiellement de la puissance qu'elles absorbent. Elle peut être représentée approximativement, d'après M. Voit, par une fonction telle que

$$I = \alpha\, w^3,$$

dans laquelle I est exprimé en pyrs et w en watts. Le coefficient α dépend de la nature du filament et particulièrement de sa surface.

D'après la formule précédente, l'erreur relative qu'on peut commettre dans la mesure de l'intensité lumineuse est triple de

l'erreur relative qu'entraîne la détermination de la puissance électrique. Par suite, si les observations photométriques sont faites à 1 pour 100 près, il faut, pour qu'il y ait équivalence, que la puissance soit mesurée avec une approximation de $^1/_3$ pour 100. Or, comme la mesure de la puissance entraîne des lectures au voltmètre et à l'ampèremètre, et comme les erreurs auxquelles exposent ces lectures peuvent être de même sens et s'ajouter, il y a lieu d'employer des instruments suffisamment précis pour ne pas occasionner une erreur supérieure à 0,16 pour 100. On n'arrive à ce résultat que si la source de courant est très constante; des accumulateurs très peu poussés sont seuls susceptibles de satisfaire à cette exigence.

Rendement lumineux des lampes à arc voltaïque. — La lumière émise par une lampe à arc ne présente pas exactement la mê distribution dans les divers azimuts à cause des déplacements du cratère, de sorte que la surface photométrique n'est pas de révolution. Pour des mesures de grande précision, il convient de déter-

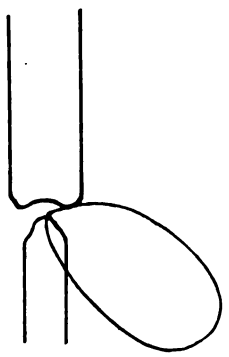


Fig. 33.

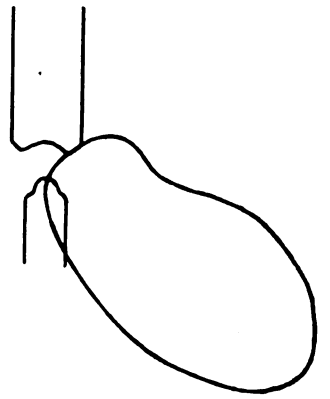


Fig. 34.

miner simultanément, au moins pour des azimuts différant de 180°, les courbes de répartition de l'intensité lumineuse. Toutefois, les intensités maxima n'offrent pas de différences sensibles; c'est pourquoi l'on se contente généralement de rechercher la répartition des rayons dans un azimut donné, pour faire le calcul de l'intensité moyenne sphérique.

On se rappelle la méthode employée par M. Rousseau pour la représentation graphique des résultats. La courbe obtenue pour une lampe à arc à courant continu montre que les intensités sont assez faibles dans l'hémisphère supérieure, surtout avec les petits arcs, dont le charbon supérieur produit un cône d'ombre très ouvert (fig. 33 et 34).

En pratique, pour abréger les mesures, on admet souvent que l'intensité moyenne sphérique d'une lampe à courant continu est donnée par la formule suivante, dans laquelle H représente l'intensité horizontale et M l'intensité maxima mesurée à 45° sous l'horizon,

$$S = \frac{H}{2} + \frac{M}{4}.$$

D'autre part, on a sensiblement

$$H = 0{,}2\ M;$$

d'où

$$S = 0{,}35\ M,$$

soit le tiers environ de l'intensité maxima.

Le flux lumineux, projeté en majeure partie sous le plan horizontal, la lumière émise dans l'hémisphère supérieure étant minime, est

$$\Phi = 4\pi S.$$

On doit se rappeler que les globes diffusants modifient complètement la répartition des rayons lumineux, en même temps qu'ils absorbent 15 à 50 pour 100 de la lumière, suivant le degré de leur transparence.

Il faut tenir compte également de ce que les flux lumineux à considérer dépendent des applications. Pour une lampe destinée à éclairer une salle, on doit considérer le flux total, déduit de l'intensité moyenne sphérique; dans le cas de l'éclairage d'un espace découvert, c'est le flux rejeté vers le bas et déduit de l'intensité hémisphérique inférieure qui entre en ligne de compte. Enfin, pour les lampes destinées à éclairer à distance, l'intensité horizontale est seule intéressante.

D'après M. Palaz, l'intensité lumineuse maxima M, en bougies décimales, des arcs à courant continu fonctionnant, à feu nu, sous

une tension de 40 à 50 volts, est donnée approximativement, en fonction de l'intensité du courant exprimée en ampères, par la formule empirique :

$$M = 200\, i + 4\, i^2.$$

On en tire

$$S = 0{,}35\, M = 0{,}35\, (200\, i + 4\, i^2).$$

La qualité des charbons a une influence considérable sur le rendement lumineux.

Les arcs alimentés par des courants alternatifs émettent des radiations lumineuses distribuées de la même manière au-dessus et au-dessous de l'horizon. Pour les petits arcs, la courbe de répartition d'un côté de l'axe des charbons comporte deux ailes de papillon à peu près symétriquement disposées par rapport à

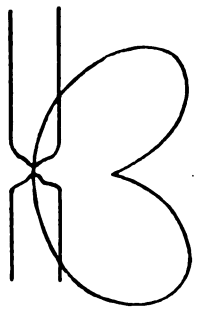


Fig. 35.

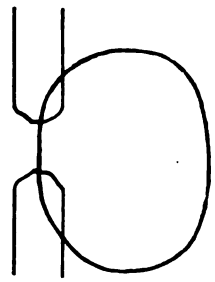


Fig. 36.

l'horizontale passant par le foyer (fig. 35). Si la longueur de l'arc augmente, le point de rebroussement disparaît et la courbe prend une forme ovoïde (fig. 36). Si l'on appelle M et M′ les intensités maxima, qui sont sensiblement égales, et H l'intensité horizontale, on a, d'après M. Blondel, pour la valeur de l'intensité moyenne sphérique des arcs de 8 à 12 ampères,

$$S = \frac{H + M + M'}{4}.$$

MESURES ÉLECTRIQUES.

Chapitre IV.

ETALONS DE MESURE.

On a cherché à représenter les unités électriques par des *étalons*, ou tout au moins à définir nettement en fonction de ces unités des grandeurs électriques faciles à reproduire. Certains phénomènes fugitifs, tels que les courants électriques, ne se prêtent pas à la réalisation d'étalons; dans ces cas, on cherche à fixer la valeur de l'unité à l'aide d'indications fournies par un *appareil-étalon*, dont les éléments de construction sont parfaitement déterminés.

Étalons de résistance. — Pouillet et Werner Siemens ont préconisé l'emploi du mercure pour réaliser un étalon de résistance, parce que ce métal peut être amené plus facilement que les métaux solides à un état de pureté et d'homogénéité bien défini, grâce à la distillation.

Le Congrès des Électriciens de 1881 avait décidé d'adopter pour étalon de l'ohm la résistance à 0°C d'une colonne de mercure de 1 mm^2 de section et dont la longueur devait être fixée par des mesures ultérieures. Diverses expériences ayant conduit à des

longueurs voisines de 106 cm, on a proposé, en 1884, une colonne mercurielle de 1 mm² de section et de 106 cm de longueur pour représenter l'*ohm légal*. D'après les dernières déterminations la colonne de mercure représentant l'ohm vrai aurait 106,3 cm à 1/5000 près; c'est pourquoi le Congrès de Chicago a défini, en 1893, sous le nom d'*ohm international*, la résistance, à la température de la glace fondante, d'une colonne de mercure pesant 14,4521 grammes, de section transversale constante et d'une longueur de 106,3 cm. C'est à cet étalon que nous nous rapporterons lorsque nous parlerons d'ohms sans autre indication.

1 ohm international = 1,0028 ohm légal.

1 ohm légal = 0,9972 ohm international.

Siemens avait défini, en 1860, une unité arbitraire, désignée par les initiales U. S. et représentée par la résistance à 0°C d'une colonne de mercure de 1 mm² de section et de 1 m. de longueur.

1 ohm international = 1,063 U. S.

1 U. S. = 0,9407 ohm international.

On trouve encore dans les laboratoires des boites de résistance dont les bobines ont été graduées à l'aide d'un étalon établi en 1864 par l'Association Britanique pour l'avancement des sciences et connu sous les initiales B. A. U.

1 ohm international = 1,01356 B. A. U.

1 B. A. U. = 0,9866 ohm international.

Les *étalons prototypes* de l'ohm sont réalisés en remplissant de mercure, purifié par voie chimique, puis par une distillation dans le vide, un tube de verre soigneusement calibré et terminé dans des coupes élargies (fig. 37). Pour faire communiquer l'étalon avec

Fig. 37.

un circuit extérieur, on plonge dans les coupes des électrodes en cuivre amalgamé. Pour tenir compte de la résistance du raccordement du mercure du tube avec celui des coupes, la longueur de la

colonne doit être réduite d'une quantité que l'expérience a montré être égale à 0,82 du diamètre du tube.

Les variations de la résistance du mercure avec la température sont indiquées par la formule

$$R_t = R_o\,(1 + 0{,}0008649\,t + 0{,}00000112\,t^2).$$

Les étalons prototypes sont utilisés à la confection des *étalons secondaires* plus portatifs destinés aux laboratoires. On a construit des étalons secondaires à mercure ayant la forme représentée dans la fig. 38, mais on utilise de préférence des résistances solides. On les compose de bobines de fil métallique isolé avec soin et enroulé en double afin d'éviter les effets électromagnétiques extérieurs et

Fig. 38.

de diminuer les réactions de self-induction. Le double enroulement a toutefois l'inconvénient d'augmenter l'influence de la capacité des bobines en rapprochant les spires à des potentiels très différents. L'étalon est pourvu d'un thermomètre destiné à déterminer exactement la température du fil.

On choisit, pour former les étalons secondaires, des métaux ayant une grande résistibilité et un faible coefficient de variation de résistance avec la température. Les alliages sont préférables à cet égard aux métaux purs, comme le montre la table ci-jointe due à MM. Fleming et Dewar (1893).

NATURE DES MÉTAUX	RÉSISTIBILITÉ EN MICROHMS-CM A 0°C.	COEFFICIENT DE VARIATION DE LA RÉSISTIBILITÉ PAR DEGRÉ, AUX ENVIRONS DE 15° C.
Argent recuit	1,468	0,00400
Cuivre id.	1,561	0,00428
Aluminium id.	2,665	0,00435
Fer id.	9,065	0,00625
Nickel id.	12,323	0,00622
Plomb id.	20,380	0,00411
Maillechort (60 Cu, 25 Zn, 15 Ni)	29,982	0,000273
Platine-argent (33 Pt, 67 Ag)	31,582	0,000243
Platinoïde	41,731	0,00031
Manganine (84 Cu, 12 Mn, 4 Ni)	46,678	0,0000
Kruppine (Cu, Ni, Mn)	85,13 (à 20°)	0,0007

Parmi les alliages, le maillechort a été longtemps le plus employé ; l'expérience a montré que sa permanence est suffisante. Les alliages de platine sont cependant mieux à l'abri de l'oxydation. Le platinoïde, qui est du maillechort légèrement additionné de tungstène, a été très employé en Angleterre. Enfin, la manganine, inventée récemment en Allemagne, est excellente au point de vue de l'indifférence vis à vis des variations de la température. Cet alliage craint, toutefois, les températures supérieures à 150° et son oxydabilité oblige à le protéger par de la soie imbibée de gomme-laque.

La fig. 39 représente un étalon secondaire formé de spires enroulées en double autour d'une carcasse en ébonite et enfermées dans une boîte en laiton V enduite intérieurement de paraffine P. Le couvercle laisse passer de grosses électrodes en cuivre T T, amalgamées aux extrémités et destinées à être plongées dans des godets à mercure.

Aux moments de l'étalonnage et de l'emploi, la caisse est baignée dans l'eau et un thermomètre indique la température de la chambre intérieure après une durée d'immersion qui ne doit pas être inférieure à plusieurs heures.

Fig. 39.

Les étalons secondaires construits pour le *Reichsanstalt*, de Berlin, sont constitués par des bobines en fil de manganine isolé avec de la soie imbibée de gomme-laque, qu'on plonge dans le pétrole afin d'atteindre rapidement l'équilibre de température. Les bobines nouvellement enroulées subissent des modifications moléculaires lentes, qui entraînent des changements de résistibilité électrique. Afin d'accélérer la mise en service des bobines, on a eu l'idée d'appliquer un procédé analogue à celui dont on fait usage pour vieillir les thermomètres. On recuit la bobine enroulée dans une étuve à air, à une température de 115° à 120°, pendant quelques heures. Le fil atteint ainsi rapidement un équilibre moléculaire permanent. Les étalons des multiples et des sous-multiples de l'ohm, de 50 ohms à 0,0001 ohm, sont constitués par deux conducteurs dérivés ; l'un de section relativement forte, présente une résistance légèrement supérieure à la valeur requise ; l'autre, beaucoup plus mince, est réglé jusqu'à obtenir la résistance combinée voulue. Les faibles résistances, 0,001 ohm et en dessous,

étant destinées à recevoir des courants intenses, sont placées dans un bain de pétrole, agité par le moyen d'une roue à palettes pour maintenir l'équilibre de température.

Boîtes de résistance. — Pour les besoins de la pratique ; on construit des boîtes étalonnées à 1/1000 près, contenant des multiples et parfois des sous-multiples de l'ohm. Ces boîtes, en acajou, portent un couvercle en ébonite sur lequel sont fixés des blocs de laiton auxquels sont soudées les extrémités des bobines étalons. Celles-ci peuvent être éliminées du circuit par l'insertion de broches métalliques mettant en communication directe les blocs reliés aux deux bouts du fil d'une même bobine (fig. 40). Les résistances groupées communément dans ces boîtes ont 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 200, 500, 1000, 2000, 2000, 5000 ohms. On adopte aussi la série 1, 1, 2, 5, 10, 10, 20, etc., ou encore 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30, 40, etc.

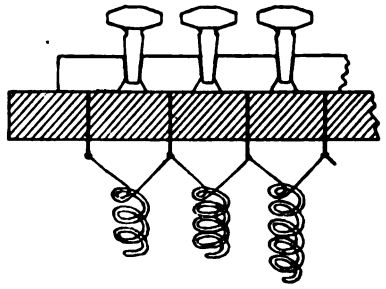


Fig. 40.

En combinant ces bobines, on peut former toutes les résistances, différant d'un ohm, comprises entre 1 ohm et la somme des résistances partielles. Le système offre l'inconvénient d'obliger à une addition pour déterminer une résistance. De plus, les bobines mises en court-circuit sont nombreuses et, comme chaque cheville présente des résistances de contact de l'ordre du $^1/_{10000}$ d'ohm, il s'ensuit une erreur parfois très appréciable sur le résultat. Ainsi lorsqu'on *débouche* la résistance d'un ohm en laissant 15 chevilles insérées, une résistance de contact de $^1/_{10000}$ pour chacune d'elles conduit à une erreur de 0,15 pour 100 sur la résistance totale. Pour diminuer autant que possible l'erreur, il

faut avoir soin de nettoyer de temps en temps les chevilles au papier d'émeri fin et de s'assurer qu'elles sont bien enfoncées, les vibrations pouvant les desserrer. Il faut vérifier également si la plaque d'ébonite qui forme le couvercle de la boîte est bien propre et l'épousseter au besoin avec un blaireau ou une bande de cuir, les traînées de poussière conductrice constituant des dérivations

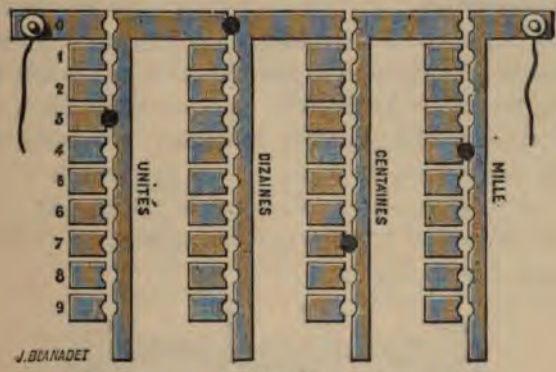


Fig. 41.

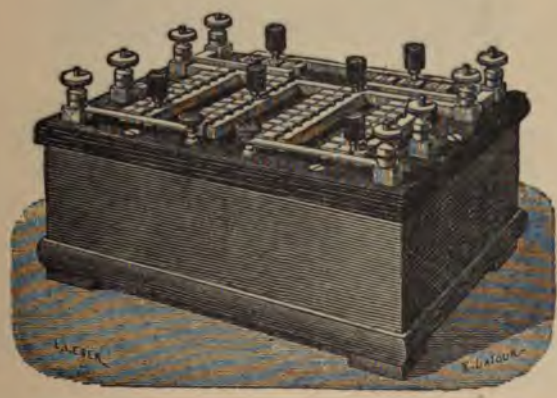


Fig. 42.

entre les blocs de laiton. A la longue, l'ébonite s'altère, particulièrement quand elle est exposée à la lumière. Le soufre qu'elle contient vient former, à la surface, un enduit blanchâtre et conducteur qu'il faut enlever en repolissant le couvercle.

Afin de faciliter les combinaisons de résistances et de diminuer le nombre de chevilles employées, on a imaginé les *boîtes à décades*. Dans ce système, représenté par les fig. 41 et 42, on se sert de 9 bobines de 1 ohm, 9 de 10 ohms, 9 de 100 ohms, etc. Ces bobines sont montées en série entre de petits blocs de laiton. A l'aide d'une seule broche insérée entre un des petits blocs et une barre de laiton voisine, on peut mettre en circuit tout ou partie des bobines de chaque série. Ainsi, pour former la résistance 4703, il suffit de 4 broches disposées dans les orifices portant les indications 4 000, 700, 00 et 3. On évite de la sorte l'addition exigée par le premier système. De plus, la correction nécessaire pour tenir compte des résistances de contact reste toujours la même. Cette deuxième disposition exige plus que le double du nombre des bobines nécessaires à la première, ce qui rend les boîtes plus volumineuses et plus chères.

Fig. 43.

Pour hâter les manœuvres, on substitue parfois une manette aux broches pour le réglage des résistances (fig. 43), mais les contacts sont alors moins bien assurés et les mesures sont moins précises lorsqu'on insère des résistances faibles.

M. Feussner a imaginé une combinaison qui réunit les avantages des deux premiers dispositifs. Chaque décade est remplacée par un groupe de 5 résistances pouvant être associées en série, de manière à former, à l'aide d'une seule cheville, une résistance totale indiquée devant l'orifice correspondant. La fig. 44 représente la disposition propre à former les résistances comprises entre 1 et 9 ohms à l'aide de 5 bobines de 1, 1, 1, 1 et 5 ohms.

Les diamètres des fils employés pour former les résistances artificielles diminuent à mesure que celles-ci augmentent, attendu que, pour une même différence de potentiel appliquée aux bornes de la boîte, les courants décroissent en raison inverse de la résistance débouchée dans cette dernière. La densité de courant admissible dépend de la résistibilité du fil employé. Avec le maillechort, les bobines de 1 ohm sont enroulées de fil de 1 mm de diamètre ; pour celles de 10 ohms on adopte 0,4 mm ; pour celles de 100 ohms 0,25 mm et pour celles de 1000 ohms ou plus 0,1 mm. La couverture isolante du fil comprend deux couches de soie blanche guipées en sens inverse ou une tresse de même matière.

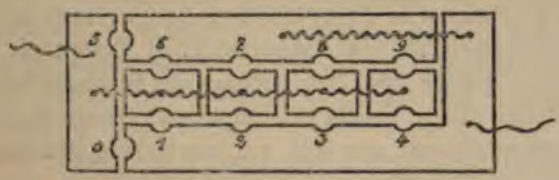


Fig. 44.

Pour construire une bobine, on commence par mesurer la résistance du fil par mètre, et l'on prépare une longueur de fil propre à réaliser un peu plus que la résistance désirée. Le fil est plié en double et enroulé sur une carcasse en bois imprégné de paraffine ou en toute autre substance isolante non hygroscopique. Le double enroulement, généralement usité, a l'inconvénient de rapprocher les spires à des potentiels très différents et de favoriser les dérivations dans le cas où le fil n'est pas très bien isolé. M. Chaperon préfère former les bobines par couches successives comprenant des nombres de spires égaux et enroulées en sens inverses. Les couches sont séparées par des épaisseurs d'étoffe de soie.

L'une des extrémités du fil est soudée à une tige de cuivre fixée par soudure à l'un des blocs de laiton du couvercle de la boîte. L'autre extrémité est serrée dans une fente faite dans la tige reliée au bloc voisin et est glissée dans cette fente jusqu'à ce qu'on obtienne la résistance voulue ; après quoi, l'on soude cette seconde extrémité. La bobine est imprégnée de paraffine pour éviter l'oxydation du fil et les dérivations par l'humidité. Après quelques

mois, il est nécessaire de vérifier la résistance de la bobine, qui peut avoir changé par suite du travail moléculaire du métal. On ajuste à nouveau la résistance, soit en renforçant une des extrémités du fil par une addition de soudure, soit en grattant le fil. On a vu qu'on peut accélérer ces opérations en recuisant le fil après l'enroulement, de manière à lui donner immédiatement son état moléculaire définitif. Avec les gros fils, on préfère opérer le réglage sur une dérivation établie sur la bobine entière ou sur une partie de celle-ci.

Le couvercle des boîtes de résistance est pourvu d'un orifice pour l'insertion d'un thermomètre. Toutefois, par le fait de la paraffine qui recouvre le fil, plusieurs heures sont nécessaires pour obtenir l'équilibre de température. Il faut avoir soin de ne jamais faire passer dans les bobines des courants intenses ou de longue durée. Tout circuit contenant une caisse de résistance doit être commandé par une clef qui est fermée seulement pendant la durée des lectures.

Si les fils n'éprouvent pas de variations de température supérieures à celles qu'on observe dans les laboratoires, la correction relative aux variations correspondantes de résistance est négligeable, lorsque les bobines sont en manganine ou en un alliage analogue.

Rhéostats. — Les boîtes de résistance ne permettent pas de varier la résistance comprise entre leurs bornes par degrés insensibles, condition requise dans certaines expériences. Ce résultat est atteint par les rhéostats.

La forme la plus simple consiste en un fil tendu parallèlement à une règle divisée, entre deux blocs de cuivre auxquels il est soudé. Un curseur glisse sur le fil de manière à présenter avec celui-ci un contact bien défini. La longueur comprise entre l'une des extrémités du fil et le curseur est insérée dans le circuit en expérience et mesurée par la règle.

Pour réaliser une longueur plus considérable dans un faible espace, on enroule le fil en hélice sur un cylindre d'ébonite. Le cylindre tourne autour de son axe dont une des extrémités est filetée et passe dans un écrou, disposition qui communique au cylindre un mouvement de translation. Un doigt de contact immobile permet d'insérer une longueur variable du fil dans le circuit. Ces appareils

laissent à désirer au point de vue des contacts mobiles et ne peuvent servir qu'avec des courants de faible intensité.

Si l'on ne désire pas des résistances définies, mais seulement des résistances variables par degrés, on peut employer des rhéostats à liquide consistant en une solution aqueuse d'un sel reliée au circuit extérieur par des électrodes en même métal que celui du sel. On adopte, par exemple, le sulfate de cuivre ou le sulfate de zinc, avec des électrodes en cuivre ou en zinc, de manière à éviter la polarisation. On fait varier la résistance en plongeant plus ou moins les électrodes dans le bain ou en changeant leur écartement.

Résistances artificielles pour courants intenses. — Les rhéostats à liquide peuvent servir pour les courants intenses, à la condition de proportionner la surface des électrodes à l'intensité du courant. Ces appareils ont l'inconvénient de varier très notablement de résistance avec la température.

Une autre combinaison consiste à disposer des fils nus, rectilignes, en zigzag ou héliçoïdaux, entre des blocs de cuivre qu'on réunit par des chevilles, comme dans les boîtes de résistance. Pour les courants très intenses, on groupe parfois des fils métalliques en dérivation, de manière à faire croître la section des conducteurs avec l'intensité du courant. Les éléments en dérivation doivent avoir une résistance individuelle relativement plus grande que dans la disposition en série, attendu que, dans le premier cas, la résistance d'un élément constitue la résistance maxima disponible.

Lorsque la différence de potentiel appliquée aux résistances est inférieure à un volt, on peut immerger les conducteurs dans l'eau sans crainte de décomposer ce liquide. On active ainsi le refroidissement des fils, surtout si l'on entretient un courant d'eau. On peut alors forcer la densité du courant électrique dans les conducteurs.

On a également préconisé l'usage de tubes conducteurs dans lesquels passe un courant d'eau.

On obtient des résistances variables par degrés insensibles, en empilant des plaques de charbon artificiel. On gradue le courant qui traverse la pile de plaques en modifiant les résistances de contact par une compression variable obtenue à l'aide d'une vis de serrage.

Lorsque les résistances artificielles doivent être soumises à des tensions de l'ordre des centaines de volts, on fait souvent usage de lampes à incandescence qui peuvent être groupées en série ou en dérivation. Les lampes de rebut permettent de constituer des résistances économiques qui ont l'avantage, lorsqu'il s'agit de courants alternatifs, d'être à peu près dépourvues de self-induction. On évite également la self-induction et l'on obtient de grandes résistances sous un faible volume en utilisant un mélange cuit d'argile et de graphite. On varie la conductibilité en modifiant la proportion de graphite. Avec des proportions égales des deux substances, on obtient une résistibilité de 0,12 ohm-cm (Fleming). De telles résistances sont capables de supporter des températures relativement élevées.

Étalons de quantité d'électricité et d'intensité de courant. — Les phénomènes d'électrisation et de courant électrique étant temporaires ne se prêtent pas à la réalisation d'étalons permanents, mais on peut déterminer le poids d'un métal déposé dans un bain électrolytique par l'unité de quantité d'électricité. D'après la décision du Congrès de Chicago, l'*ampère international* est représenté par le courant qui, traversant une solution de nitrate d'argent dans l'eau, dépose 0,00118 gramme d'argent par seconde. On verra, à propos du tarage des galvanomètres, les précautions exigées pour effectuer le dépôt dans les conditions normales. Cette définition règle également le *coulomb international*. La même quantité d'électricité dépose 0,0003287 gramme de cuivre.

On fait aussi usage d'électrodynamomètres étalons de construction bien définie dont les indications correspondent à des courants déterminés. (Voir ci-après les balances de Lord Kelvin et de M. Pellat).

Étalons de force électromotrice. — Quelques éléments voltaïques développent, dans des conditions déterminées, une force électromotrice suffisamment constante pour servir d'étalons.

L'un des éléments les mieux étudiés est l'élément normal de Latimer-Clark. Sous la forme recommandée par le *Board of Trade*, de Londres, l'élément comprend un fil de platine plongeant dans le mercure versé au fond d'un tube à réactif noirci extérieurement.

Au dessus du mercure se trouve une pâte de sulfate de zinc et de sulfate mercureux, préparée à froid et dans laquelle est placé un bâton de zinc (fig. 45).

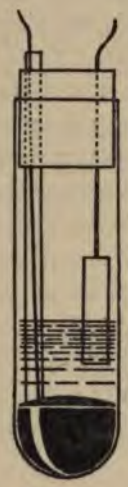


Fig. 45.

Le mercure doit être purifié par l'acide sulfurique concentré, puis distillé dans le vide. Le zinc doit être redistillé. La tige de ce métal est soudée à un fil de cuivre, décapée dans l'acide sulfurique dilué, puis lavée à l'eau distillée et séchée sur du papier à filtrer.

Pour préparer la pâte, on commence par ajouter à du sulfate de zinc du commerce, purifié par une seconde cristallisation, 50 pour 100 de son poids d'eau et 2 pour 100 d'oxyde de zinc destiné à neutraliser l'acide libre. On effectue la dissolution à une température qui ne doit pas excéder 30° C. On incorpore dans la solution 12 pour 100 de sulfate mercureux, en vue de transformer l'excès d'oxyde de zinc en sulfate; on filtre pour éliminer l'oxyde mercureux formé et on laisse cristalliser par refroidissement. Pour obtenir le sulfate mercureux à employer, on se procure du sulfate mercureux commercialement pur, on le lave à l'eau distillée froide, l'on décante et l'on répète deux fois cette opération, qui a pour effet d'éliminer le sulfate mercurique, reconnaissable à sa teinte jaune. On mélange ensuite les cristaux de sulfate de zinc avec du sulfate mercureux et une petite quantité de mercure; à l'aide de

la solution concentrée de sulfate de zinc, on donne au mélange la consistance d'une crême. On agite énergiquement en maintenant une température n'excédant pas 30° C. Lors du refroidissement, il doit se former des cristaux de sulfate de zinc dans toute la masse; s'il n'en est pas ainsi, on ajoute quelques cristaux et l'on répète l'opération.

Le tube à réactif mesure 2 cm de diamètre et 6 à 7 cm de longueur. Le mercure occupe 1,5 cm de hauteur; on y fait plonger le fil de platine qui est protégé, hors du mercure, par un tube de verre dans lequel il est scellé. La partie du fil qui doit être immergée dans le mercure est chauffée au rouge au préalable. La pâte est versée dans le tube sur une hauteur de 2 cm. On enfonce la tige de zinc dans la partie supérieure de la pâte et l'on ferme le récipient par un bouchon de liége lavé à l'eau chaude et percé de trous pour le passage des électrodes ainsi que de l'air. On laisse reposer l'élément pendant 24 heures et on le scelle à la glu marine. Lors de l'emploi, on le place dans un bain d'eau, afin d'en déterminer facilement la température.

On recommande de n'utiliser cet élément qu'en circuit ouvert avec des électromètres ou des condensateurs, ou seulement dans les méthodes de compensation où il n'a à débiter que des courants très faibles.

La force électromotrice de cet élément est 1,434 volt international à 15° C, à moins d'un millième près. A une température t, voisine de 15°, la force électromotrice est donnée par la formule

$$E = 1{,}434 - 0{,}001\,(t - 15).$$

L'élément précédent n'est pas portatif, car un renversement peut amener le mercure en contact avec le zinc. Une forme moins précaire peut être réalisée par l'emploi d'un tube en forme de H. A la partie inférieure d'une des branches on verse un amalgame contenant 10 pour 100 de zinc et 90 pour 100 de mercure. Un fil de platine scellé dans le verre vient plonger dans cet amalgame.

Il résulte des expériences de M. Skinner, que l'élément Clark peut fournir, sans danger, un courant de 0,0001 ampère par centimètre carré de surface de l'électrode en zinc. L'élément du Board of Trade peut, d'après cela, être mis en circuit sur

une résistance de 10000 ohms. Au bout d'une heure, la force électromotrice ne diminue, dans ces conditions, que de 0,0002 de sa valeur initiale.

Afin de rendre l'élément transportable, le *Reichsanstalt* a adopté la disposition suivante (fig. 46). Le pôle positif est constitué par une lame de platine amalgamé, plongeant dans la pâte de sulfates contenue dans un vase poreux. La lame communique avec l'extérieur par un fil de platine traversant un tube de verre. Le pôle négatif est un bâton de zinc amalgamé traversant aussi un tube de verre et recourbé à son extrémité inférieure, où il est en contact avec des cristaux de sulfate de zinc noyés dans une solution con-

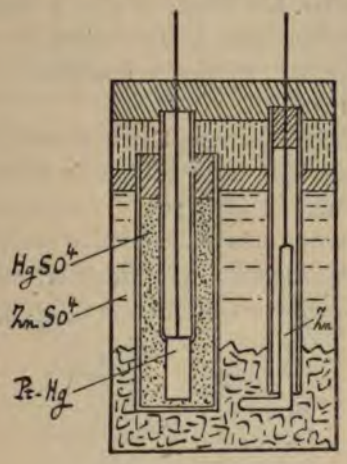


Fig. 46.

centrée de ce sel. L'élément est fermé par un bouchon de liége, une couche de paraffine et une couche de résine. Un thermomètre, non indiqué dans le dessin, plonge dans la solution zincique. Le vase extérieur en verre est placé dans une enveloppe métallique protectrice fermée par un couvercle en ébonite qui porte les bornes d'attache. L'élément mesure 10 cm de hauteur et 6 cm de diamètre. Il peut donner un courant de 100 micro-ampères pendant quelques instants. Ce couple constitue une ressource précieuse pour les opérations d'étalonnage.

Si une approximation de 1/100 est suffisante, on peut se con-

97432

tenter d'employer des substances commercialement pures, en ayant soin de préparer la pâte à froid, après avoir vérifié si elle est exempte de sulfate mercurique jaune, d'amalgamer le zinc et de faire plonger un simple fil de platine dans du mercure placé au fond du vase poreux. On obtient ainsi un couple qui est susceptible d'une plus grande précision que la plupart des combinaisons à base de sulfate de cuivre qui ont été employées. On peut faire produire à ces éléments des courants proportionnels à leurs dimensions, environ 0,0001 ampère par cm^2 d'électrode en zinc.

M. Gouy emploie, comme dépolarisant, le bioxyde jaune de mercure disposé au dessus d'une couche de mercure dans laquelle plonge un fil de platine. Un bâton de zinc amalgamé, protégé par du papier à filtrer, baigne dans une solution de sulfate de zinc à la densité 1,06. Cet élément, destiné à fonctionner à circuit ouvert, donne 1,383 volt à 12° C.

M. Weston a modifié l'élément Clark en remplaçant le zinc par un amalgame de cadmium et le sulfate de zinc par le sulfate de cadmium. L'amalgame, préparé à 100° C et contenant 1 de cadmium pour 7 de mercure, entoure le fil de platine scellé au fond de l'une des branches d'un tube de verre en forme de H; dans l'autre branche, le fil de platine est recouvert de mercure (fig. 47). Une solution

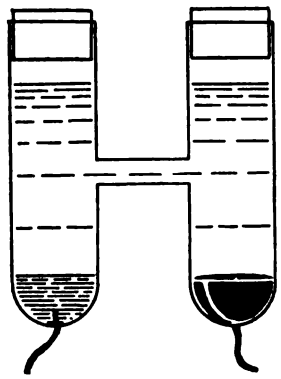


Fig. 47.

saturée et neutre de sulfate de cadmium, mélangé avec du sulfate mercureux lavé et bien dépourvu de cristaux de sulfate mercurique, remplit l'élément. Celui-ci présente l'avantage de prendre

immédiatement sa force électromotrice normale de 1,028 volt international à 15° C, tandis que l'élément Clark doit reposer quelques semaines avant l'emploi. Le coefficient de variation de la force électromotrice avec la température n'atteint que le dixième de la valeur de celui de l'élément Clark et il peut être négligé dans les mesures industrielles.

Lorsque les étalonnages exigent des courants d'une certaine intensité, on emploie parfois des éléments à sulfate de cuivre ou des accumulateurs, qu'on tare au préalable à l'aide du couple Clark.

L'élément Daniell étalon a pour électrodes une lame de cuivre recouverte d'un dépôt électrolytique nouvellement formé du même métal et une lame de zinc amalgamé, plongeant, la première dans une solution de sulfate de cuivre, la seconde dans une solution de sulfate de zinc. Dans le modèle du Post-Office de Londres (fig. 48), les deux liquides sont séparés par un vase poreux qu'on place dans l'eau, contenue dans un compartiment spécial, lorsque la pile ne fonctionne pas. Le zinc est également mis à part pendant les

Fig. 48.

périodes d'inactivité pour éviter qu'il ne se recouvre du cuivre dont la solution sulfurique aurait traversé le vase poreux. Les parties constituantes de la pile ne sont réunies qu'au moment de l'emploi. Dans le cas où les deux solutions ont chacune la densité 1,20 à 15° C, la force électromotrice est 1,103 volt. Les changements de température n'exercent pas d'influence sensible sur la force électromotrice, mais les variations de concentration des liquides ont, au contraire, un effet marqué. Il faut beaucoup de soins pour

arriver à obtenir l'approximation de 1/100 avec les éléments à sulfate de cuivre, tandis que l'élément Clark donne aisément l'approximation de 1/1000.

Étalons de capacité. — L'unité usuelle de capacité est le microfarad. Elle est représentée par des condensateurs plans dont les armatures sont constituées par deux cahiers de feuilles d'étain. Ces feuilles sont alternées et isolées par des feuilles de papier paraffiné. Les feuilles d'étain de chaque cahier ont un coin coupé et elles sont réunies par un autre coin entr'elles et à un fil de cuivre, la jonction étant assurée au moyen d'une soudure à basse température. Les feuilles des deux cahiers sont empilées de manière que les coins coupés d'un des cahiers correspondent aux coins soudés de l'autre (fig. 49). Les feuilles de papier débordent tout autour des feuilles d'étain, afin d'assurer l'isolement de celles-ci. Elles ont deux coins coupés qui laissent dépasser les coins soudés des feuilles d'étain.

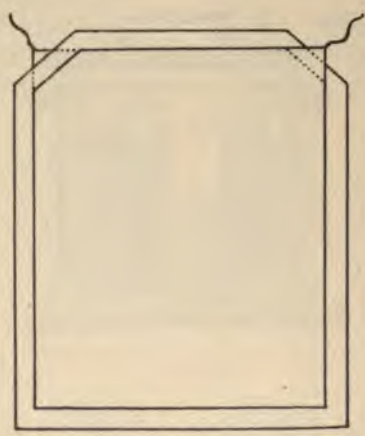


Fig. 49.

Les feuilles de papier sont desséchées et immergées au préalable dans la paraffine. On a soin de mettre assez de feuilles d'étain pour obtenir une capacité un peu supérieure à celle à laquelle l'on désire arriver. Lorsque les feuilles sont empilées, on porte le tout sous une presse chauffée, pour exprimer l'excès de paraffine. Après refroi-

dissement, on étalonne le condensateur en déchirant des feuilles d'étain jusqu'à ce qu'on ait atteint la capacité voulue. On met alors le bloc dans une caisse en bois, sur un lit de paraffine et l'on remplit la boîte de paraffine. Les fils de cuivre sont fixés à des blocs de laiton portés par le couvercle en ébonite de la boîte.

La figure 50 montre la vue extérieure d'un appareil qui comporte 5 subdivisions du microfarad. Chacune des parties du conden-

Fig. 50.

sateur communique, d'une part, avec l'une des barres longitudinales et, d'autre part, avec un des blocs centraux. A l'aide de fiches, on peut associer les éléments divisionnaires en surface.

Lorsqu'un condensateur est inactif, il faut avoir soin de réunir les deux armatures par une fiche métallique, afin d'éviter qu'une tension accidentellement exagérée ne détériore l'isolant. Les condensateurs ordinaires ne doivent pas être soumis à une différence de potentiel supérieure à 100 volts, à moins d'indications spéciales. L'exactitude des condensateurs à feuilles paraffinées est rarement supérieure au $^1/_{100}$.

M. Bouty a réalisé des condensateurs de très petit volume, en formant les éléments de plaques minces de mica argentées sur une face. Le pouvoir inducteur spécifique du mica est supérieur à celui du papier paraffiné. MM. Siemens et Halske emploient le mica et les feuilles d'étain. MM. Berthoud, Borel et C^ie^ se servent de feuilles de papier imprégné d'un mélange d'huile de lin et de colophane.

Pour certaines études, on doit réaliser des *câbles artificiels*, qui présentent une capacité et une résistance réparties de la même manière que dans les câbles sous-marins. Deux procédés sont en

usage pour former ces appareils. Le premier consiste à disposer en série des bobines de résistance calibrées entre lesquelles sont échelonnés des condensateurs réunis en dérivation et produisant ainsi un effet de condensation analogue à celui qu'on observe avec les câbles (fig. 51).

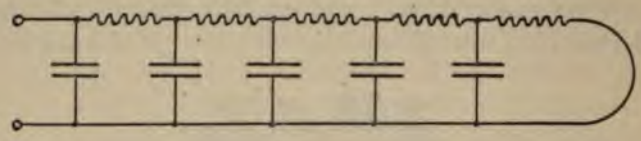


Fig. 51.

Le second moyen, imaginé par Muirhead, permet de répartir la capacité uniformément. L'une des armatures d'un condensateur est formée de feuilles d'étain, comme dans les condensateurs ordinaires. L'autre armature comporte des bandes d'étain disposées en zigzag et reliées en série de manière que leur résistance représente la résistance du câble. En constituant le diélectrique par une résine qui présente les mêmes effets de charge résiduelle que la gutta-percha, on peut étudier, à l'aide de ces câbles artificiels, tous les phénomènes observés dans les câbles sous-marins.

Fig. 52.

Étalons d'induction. — MM. Ayrton et Perry ont construit un étalon variable de self-induction en disposant à l'intérieur d'une bobine circulaire fixe une seconde bobine en série avec la première et pivotant autour d'un axe diamétral, ce qui permet de faire varier l'angle des deux bobines entre les limites 0° et 180° (fig. 52). La self-induction du système est minima lorsque les bobines sont parallèles et parcourues par le courant en sens opposés. Lorsque la bobine mobile a fait un demi tour, l'induction devient maxima. Une graduation empirique indique les valeurs de la self-induction correspondant à des positions repérées. Les bobines sont enroulées sur des carcasses en bois qui, malgré tous les soins que le constructeur peut apporter à leur exécution, se déjettent à la longue en causant des variations du coefficient d'induction. D'un autre côté, la capacité des spires voisines doit être prise en considération dans les mesures où l'on fait usage de cet étalon.

Chapitre V.

COMMUTATEURS ET CLEFS.

Classification d'après le mode de contact. Commutateurs à mercure, à frottement et à pression. — Les commutateurs et clefs sont des appareils accessoires d'un emploi très fréquent dans les mesures électriques. Ces appareils servent à combiner diversement différents circuits ou à relier entr'elles les parties d'un même circuit.

Il importe que la résistance électrique des contacts établis au moyen des commutateurs et des clefs soit aussi faible que possible. A ce point de vue, ces appareils peuvent être rangés dans les trois classes suivantes.

1. *Commutateurs à mercure.*— Les différents fils à réunir plongent dans des godets remplis de mercure et les communications s'établissent d'un godet à l'autre au moyen de cavaliers en cuivre décapés au préalable et amalgamés aux extrémités.

Grâce à l'amalgamation, les liaisons sont aussi intimes que possible. On fait usage de godets en porcelaine disposés dans les trous d'une planchette en bois ou de godets en cuivre portés sur un socle en ébonite.

Dans les clefs suivantes, où le contact a lieu entre deux pièces métalliques solides, la résistance électrique des contacts est plus considérable que celle des contacts mercuriels; de plus, elle

est très variable avec la pression exercée sur les pièces et l'état de la surface de ces dernières. Cependant, on les emploie de préférence aux commutateurs à mercure qui entraînent des pertes de ce métal et se salissent rapidement. Il faut avoir soin de ne jamais ouvrir un circuit où passe un courant intense par un commutateur à mercure, car il se produirait des projections mercurielles.

2. *Commutateurs à frottement.* — Les commutateurs à frottement les plus employés sont le commutateur à manette, la clef à couteau et le commutateur à broches. Dans le premier, un levier métallique, manœuvré à l'aide d'une manette, peut tourner autour d'un axe; dans ce mouvement, le levier glisse en frottant sur une série de blocs en laiton disposés circulairement sur un support isolant en bois ou en ébonite. Ce dispositif permet de relier un fil aboutissant à l'axe successivement aux divers conducteurs attachés aux blocs de cuivre. Afin d'éviter l'amenée du courant à la lame par le pivot même de son support, on fait appuyer une extrémité du levier sur un empâtement de ce dernier. Cet arrangement procure une surface de contact bien nette et soulage l'axe en équilibrant l'effort exercé par le grand bras du levier (fig. 53).

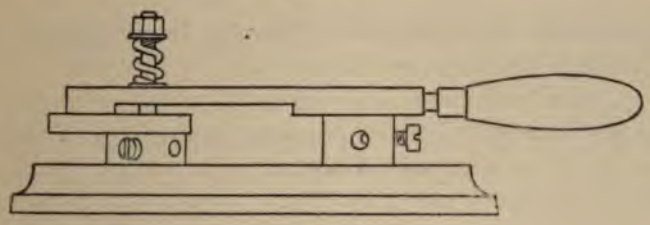


Fig. 53.

La clef à couteau comporte une lame de cuivre mobile autour d'une de ses extrémités et qu'on amène entre deux paires de mâchoires métalliques reliées aux conducteurs à mettre en communication (fig. 54). Ce système, très employé pour les courants intenses, permet d'obtenir de larges surfaces de contact (5 mm² par ampère) et de renouveler aisément les mâchoires altérées par les étincelles d'extra-courant. L'axe de rotation du levier ne fait pas partie du circuit électrique.

Le commutateur à broches permet de réunir les fils, aboutissant à des blocs de laiton, par l'intermédiaire de fiches métalliques analogues à celles des boîtes de résistance.

Fig. 54.

3. *Commutateurs à pression.* — Ils sont constitués par une lame métallique qu'on abaisse sur un buttoir pour fermer le circuit. Ces clefs demandent un certain entretien, à cause des étincelles qui, au moment de la rupture du courant, jaillissent entre les surfaces de contact et les oxydent. Bien que ces surfaces soient garnies de platine, les commutateurs de ce genre ne conviennent pas pour les courants intenses.

Classification d'après le mode d'emploi. Interrupteurs. Inverseurs. Clefs de décharge. — On peut aussi classer les clefs d'après le rôle qu'elles jouent dans les circuits électriques. Voici les types les plus employés dans les mesures électriques. Dans la plupart de ces mesures, il est nécessaire d'assurer un isolement élevé à toutes les parties du circuit. Les clefs sont montées sur ébonite et les bornes d'attache sont portées par des colonnettes de même substance, afin de réduire autant que possible les dérivations de courant.

Clefs d'interruption ou interrupteurs. Ce sont les plus simples ; on les emploie pour ouvrir ou fermer à volonté un circuit. Une lame élastique pouvant être abaissée sur un buttoir résout le problème.

Clefs d'inversion ou inverseurs servant à envoyer le courant d'une pile dans un circuit, tantôt dans un sens, tantôt en sens contraire.

Un modèle très employé est représenté schématiquement dans la figure 55. Les extrémités du circuit sont reliées à deux lames élastiques en laiton durci ; les deux pôles de la pile à deux traverses

rigides situées l'une au dessous, l'autre au dessus des lames. Normalement ces dernières appuient contre la traverse supérieure ; le circuit est ainsi fermé sur lui-même et la pile est isolée. En abaissant alternativement les lames, on envoie dans le circuit des cou-

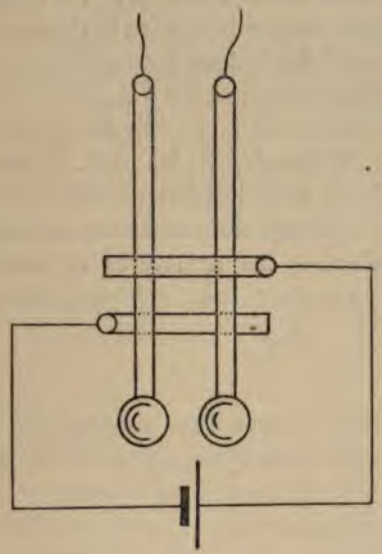


Fig. 55.

rants de sens inverses. On peut maintenir les lames abaissées par des cames en ébonite. Il faut avoir soin de ne pas intervertir les connexions indiquées, sinon la pile serait mise en court-circuit par la traverse supérieure.

Fig. 56.

Clefs de décharge destinées à provoquer la charge et la décharge d'un condensateur. La clef de Sabine (fig. 56) comporte une lame, poussée vers le haut par un ressort et mobile entre deux traverses rigides. L'une des armatures du condensateur est reliée à la lame, tandis que l'autre communique avec la pile et le circuit de décharge connectés d'autre part respectivement à la traverse inférieure et à la traverse supérieure. Grâce à deux becs portés par des leviers pivotant autour d'un même axe et situés à des hauteurs différentes, on peut soit isoler la lame, soit la mettre en communication avec la traverse inférieure. Si l'on dégage les becs, la lame revient contre la traverse supérieure sous l'action du ressort. L'abaissement de la lame détermine la charge du condensateur, la position moyenne correspond à l'isolement des armatures et le relèvement produit la décharge.

Chapitre VI.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE.

Classification des appareils utilisés à la mesure des courants. — Le plus grand nombre des mesures électriques comporte la détermination de l'intensité d'un courant ou la simple constatation du passage d'un courant ; d'où l'importance des appareils destinés à la mesure des courants. Ces appareils sont basés sur l'un quelconque des effets du courant, à savoir :

l'*effet électromagnétique*, ou action du courant sur un aimant ;

l'*effet électrodynamique*, ou action d'un courant sur un courant ;

l'*effet chimique*, ou électrolyse ;

et, enfin, l'*effet calorifique*, régi par la loi de Joule.

La mesure de la quantité d'électricité qui traverse un circuit est liée à celle de l'intensité du courant. Ainsi, le voltamètre permet d'estimer la quantité d'électricité et, par une simple division par le facteur temps, fait connaître l'intensité moyenne du courant. Nous ne séparerons donc pas ces deux genres de mesures ; nous ne reporterons dans un chapitre spécial que les compteurs coulombmètres qui poursuivent un objectif tout particulier.

Description des galvanomètres à aimant fixe.— Nous étudierons, en première ligne, les galvanomètres qui utilisent l'action d'un aimant fixe sur une bobine mobile, appelée cadre galvanométrique

ou multiplicateur, parcourue par le courant à mesurer. Ces appareils ont reçu de nombreuses applications dans les laboratoires industriels. Le principe en a été indiqué par Maxwell, mais c'est à MM. Deprez et d'Arsonval qu'on doit la première forme pratique de ces instruments.

La figure 57 représente un modèle simple, que l'auteur a étudié en vue d'en faciliter la construction par les élèves de l'Institut Montefiore. Une planchette verticale porte deux aimants en fer à cheval pourvus de pièces polaires concaves embrassant un noyau

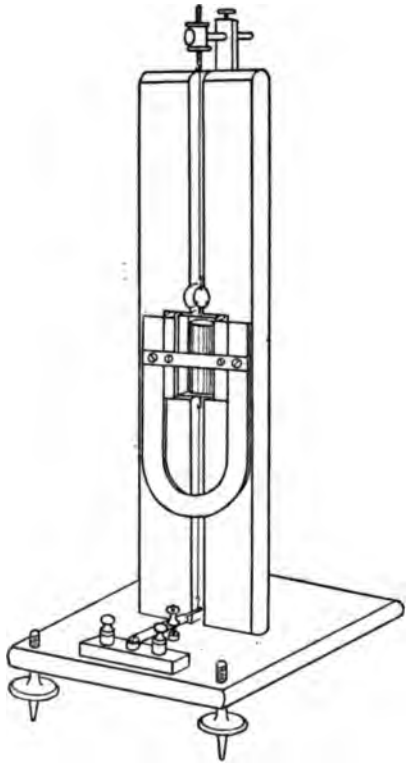


Fig. 57.

tubulaire. Celui-ci est destiné à ménager un entrefer cylindrique d'épaisseur constante à travers lequel les lignes de force rayonnent uniformément. Le flux magnétique est donc normal aux surfaces polaires dans l'entrefer; dans le noyau, il affecte la courbure de

celui-ci. Il est nécessaire d'arrondir les bords latéraux des pièces polaires pour éviter que les lignes de force ne s'y accumulent. Dans l'entrefer est suspendue une bobine entre deux fils métalliques droits qui lui amènent le courant. Il est à conseiller d'aplatir les fils de suspension afin de diminuer leur constante de torsion et de favoriser le rayonnement de la chaleur qui s'y développe par l'effet Joule. Les spires de la bobine sont empâtées dans du vernis à la gomme-laque afin de se soutenir sans déformation. Le fil de suspension supérieur aboutit à une tête de torsion. Le fil inférieur est fixé à une lame élastique réglable par le moyen d'une vis de pression, à l'aide de laquelle on peut faire varier la tension des fils et, par suite, la sensibilité de l'instrument. Ces fils, en bronze phosphoreux, mesurent 22 cm de longueur et 0,15 mm de diamètre avant l'aplatissement; leur résistance totale est de 1,5 ohm. Leurs extrémités sont soudées. Un miroir, fixé par des griffes, permet de faire les lectures par réflexion. Les pièces d'attache des fils de suspension, ainsi que les bornes de l'appareil sont montées sur des blocs en ébonite, le bois ne présentant pas une résistance d'isolement suffisante.

Dans le système précédent, le centre de gravité de l'équipage mobile n'est généralement pas situé sur l'axe des fils de suspension. Si celui-ci présente une légère obliquité par rapport à la verticale, le centre de gravité remonte quand la bobine tourne dans un sens, tandis qu'il descend pour un déplacement inverse; de là résultent, pour une même déviation, des couples directeurs parasites différant avec le sens de celle-ci. Pour éviter cet inconvénient et réduire la hauteur de la suspension, l'auteur a suspendu la bobine entre deux boudins de fil métallique. Le ressort supérieur est en bronze phosphoreux et fournit le couple directeur. Son axe est occupé par un fil de cocon qui supporte le poids du multiplicateur. Le ressort inférieur, en cuivre doux, ne sert qu'à conduire le courant; il doit être assez souple pour que le centre de gravité de la bobine se place sur le prolongement du fil de cocon.

La figure 58 montre un tel appareil qui, dans sa forme primitive, ne présentait pas les pièces polaires courbes utilisées actuellement pour régulariser le champ magnétique. Les boudins adoptés ont 10 mm de diamètre et sont faits en fil de 0,15 mm. Le fil développé

mesure 1 m pour le boudin supérieur et 3 m pour le boudin inférieur, ce qui correspond à une résistance de 6 ohms.

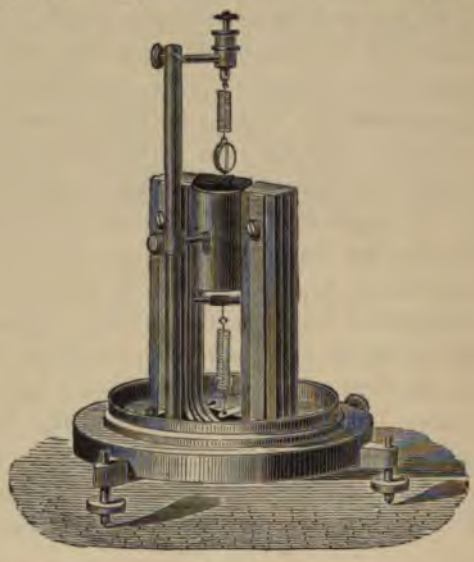


Fig. 58.

Ce mode de suspension donne au galvanomètre une grande sensibilité et évite les torsions permanentes qui subsistent après une déviation trop forte lorsqu'on emploie des fils droits de faible longueur.

En 1888, l'auteur, ayant à étudier des enregistreurs à bobines mobiles de très petites dimensions, a supprimé le noyau central et fait usage des pièces polaires plates et très rapprochées, laissant entr'elles un champ magnétique sensiblement uniforme. MM. Ayrton et Mather ont employé, indépendamment, cette disposition qui conduit à des équipages mobiles très légers. La bobine de forme allongée est logée dans un tube en argent qui sert d'amortisseur, grâce aux courants développés par sa rotation dans le champ des aimants. Elle est suspendue à un fil plat en bronze phosphoreux, dont la section mesure 0,27 mm sur 0,05 mm, dans un autre tube de laiton fermé par une glace à l'endroit du miroir mobile. La bobine est reliée inférieurement à un boudin souple en bronze. Un ressort plat muni d'une vis de réglage permet de caler le tube d'argent dans le tube de laiton, pour empêcher le bris de

la suspension pendant le transport. Le tube de laiton se glisse entre les pôles de l'aimant et les connexions électriques s'établissent automatiquement par des ressorts. On peut ainsi changer facile-

Fig. 59.

ment l'équipage mobile et le remplacer par un autre d'une résistance différente suivant la nature des mesures à exécuter (fig. 59).

Théorie des galvanomètres à aimant fixe. — Lorsqu'un courant traverse le cadre mobile disposé parallèlement à la ligne des pôles de l'aimant, la bobine tend à se placer normalement à cette ligne, de manière à embrasser le plus grand nombre de lignes de force magnétique possible; mais la torsion de la suspension exerce un couple antagoniste croissant avec l'angle de déviation.

Dans l'évaluation du moment du couple électromagnétique, il y a lieu de distinguer le cas des bobines à noyau tournant dans un entrefer où le champ est radial et le cas des bobines sans noyau se mouvant dans un champ uniforme.

En appelant $\mathfrak{H}$ l'intensité moyenne du champ dans lequel se déplacent les côtés verticaux de la bobine de hauteur h et de largeur l, i l'intensité du courant, n le nombre de spires du cadre, la force électromagnétique est $i\mathfrak{H}nh$ dans le premier cas et, comme cette force est dirigée normalement au plan des spires de la bobine, le couple est $i\mathfrak{H}nhl = i\mathfrak{H}sn$, s étant la surface moyenne d'une spire. D'autre part, le moment du couple antagoniste peut, si la déviation est faible, être représenté par $c\alpha$, c étant la constante de torsion de la suspension.

L'angle d'équilibre satisfait à la condition

$$\mathfrak{H}sni = c\alpha;$$

d'où

$$i = \frac{c\alpha}{\mathfrak{H}sn} = \mathrm{A}\,\alpha.$$

Le facteur $A = \frac{i}{\alpha}$ s'appelle *facteur de réduction du galvanomètre ;* c'est le courant correspondant à l'unité d'angle.

Dans le cas des appareils à lecture par réflexion, on définit ordinairement sous le nom de *constante* le nombre de divisions de l'échelle représentant un micro-ampère. Il est nécessaire d'indiquer une fois pour toutes la longueur d'une division et la distance de l'échelle au miroir afin de permettre de calculer l'angle correspondant, donnée indispensable pour comparer entr'elles les sensibilités d'appareils placés dans des conditions différentes.

Un autre moyen de comparaison consiste à indiquer la *formule de mérite* des galvanomètres, définie par le courant qui produit une déviation d'un millimètre sur une échelle située à 1 m de distance.

La constante d'un galvanomètre mesure sa *sensibilité.* L'*exactitude* de l'appareil, qu'il ne faut pas confondre avec la sensibilité, est, dans des conditions d'emploi déterminées, l'inverse de l'erreur relative de mesure, c'est à dire le rapport de la déviation totale à la plus petite déviation appréciable.

On détermine le facteur de réduction par une expérience préalable, consistant à faire passer dans le galvanomètre un courant d'intensité connue i' ; α' étant l'angle de déviation correspondant, on a

$$A = \frac{i'}{\alpha'}.$$

Dans le cas où la bobine est dépourvue de noyau et se meut dans un champ uniforme, dont les lignes de force sont des droites parallèles normales aux plans polaires en regard, le couple électromagnétique est le produit de la force $i\mathfrak{H}nh$ par le bras de levier du couple, qui est $l\cos\alpha$ attendu que la force est normale à la direction du champ.

On a donc

$$i\mathfrak{H}sn\cos\alpha = c\alpha,$$

d'où

$$i = \frac{c}{\mathfrak{H}sn}\,\frac{\alpha}{\cos\alpha}.$$

La complexité de cette fonction est la raison qui a engagé l'auteur à abandonner ce système. On ne peut négliger le paramètre $\cos\alpha$

que si l'on se sert de l'appareil entre des limites de déviation très restreintes. Il est toutefois possible d'étudier une courbure des pièces polaires propre à donner un champ dont la variation compense les effets de l'obliquité de la bobine par rapport aux lignes de force.

Dans tous ces appareils, on doit donner aux aimants la plus grande puissance possible. Dans certains cas spéciaux, on a recours aux électro-aimants pour accroître l'intensité du champ et, partant, le couple électromagnétique. Mais il est difficile de maintenir l'intensité du champ invariable, par suite de l'hystérésis des noyaux.

Il convient d'approprier la résistance des galvanomètres à celle des circuits dans lesquels ils sont introduits. Il est facile de démontrer qu'on obtient la sensibilité maxima lorsque la résistance du galvanomètre est voisine de celle du circuit extérieur. Supposons que le volume du cadre soit donné et négligeons les interstices entre les fils et l'espace occupé par l'isolant. En appelant r la résistance d'une spire unique, qui occuperait tout le volume disponible, la résistance est $R = n^2 r$, dans le cas de n spires. Pour une force électromotrice e et une résistance extérieure ρ, l'intensité du courant est exprimée par

$$i = \frac{e}{\rho + R} = \frac{e}{\rho + n^2 r}$$

et l'action électromagnétique est

$$\mathcal{K}\, s\, n\, i = \frac{\mathcal{K}\, s\, n\, e}{\rho + n^2 r}.$$

Cette action est maxima pour

$$\rho = n^2 r.$$

Cette condition n'est jamais rigoureusement applicable, mais lorsqu'on disposera de plusieurs galvanomètres, on choisira celui dont la résistance concorde le mieux avec la résistance du circuit sur lequel on expérimente.

Les appareils à bobine mobile possèdent l'avantage précieux d'être peu influencés par les courants et les aimants voisins, dont les champs magnétiques sont faibles, dans l'espace où se meut la bobine, comparés à celui des aimants inducteurs.

En outre, le mouvement de la bobine mobile peut être aisément amorti, grâce aux courants induits qui se développent dans celle-ci pendant son déplacement dans le champ des aimants. On est maître de varier le couple amortisseur, en modifiant la résistance du circuit relié à l'appareil. Comme cette résistance est souvent imposée par les conditions d'expérience, on réalise quelquefois un amortissement invariable en enroulant la bobine sur un cadre en aluminium sans soudure ou en plaçant la bobine dans un tube en cuivre ou en argent.

Pour les deux raisons que nous venons d'indiquer, l'usage des appareils à bobine mobile s'est rapidement répandu dans les laboratoires électrotechniques.

La forme à donner à la bobine n'est pas indifférente. A surface égale, la forme carrée est, parmi les formes rectangulaires, celle qui présente le périmètre minimum et qui procure le plus grand couple pour une résistance électrique déterminée. Par contre, une bobine carrée présente un moment d'inertie relativement grand, ce qui rend l'amortissement des oscillations plus difficile. Pour les emplois usuels, on cherche à rendre aussi grand que possible le rapport du moment du couple déviant, qui est proportionnel à la largeur de la bobine, au moment d'inertie, qui varie proportionnellement au carré de cette dimension. On est donc amené à réduire autant que possible la largeur.

La mise en station du galvanomètre s'opère en observant les indications données à propos de la description des systèmes de lecture par réflexion. Pour éliminer les petites erreurs de réglage de l'échelle par rapport au miroir, on intervertit le sens du courant à mesurer de manière à obtenir des déviations α et α' de part et d'autre de la position d'équilibre. Si l'ajustement était parfait, on aurait $\alpha = \alpha'$. S'il y a une différence, la valeur véritable est $\frac{\alpha + \alpha'}{2}$.

Avant de se servir de l'appareil, il est nécessaire de s'assurer de la proportionnalité des déviations aux courants. Pour cela, on y fait passer des courants croissant dans un rapport connu. On construit un diagramme en portant en abscisses des valeurs proportionnelles aux courants et en ordonnées les déviations correspondantes. Si la proportionnalité existe, la ligne obtenue est une droite, lorsque l'échelle du galvanomètre est circu-

laire. Dans le cas contraire, la courbe empirique trouvée donne les corrections à apporter aux résultats d'observation. Dans les galvanomètres de faible résistance, les effets thermo-électriques produisent parfois des déviations gênantes. Il faut avoir soin d'employer le même métal pour toutes les parties du circuit et des appareils, afin que les différences de température ne puissent pas donner lieu à des couples thermo-électriques.

Shunts. — Un galvanomètre construit pour mesurer des courants très faibles peut également servir à la détermination des courants intenses, si l'on dispose entre les bornes de l'appareil une résistance connue, ou *shunt*, qui absorbe la majeure partie du courant à évaluer.

Si g est la résistance du galvanomètre, s celle du shunt, I le courant total, le courant dans le galvanomètre a pour intensité

$$i = \mathrm{I}\frac{s}{s+g} = \frac{\alpha}{k},$$

d'où

$$\mathrm{I} = \frac{s+g}{s}\frac{\alpha}{k}.$$

Le rapport $\frac{s+g}{s} = m$ s'appelle *pouvoir multiplicateur* du shunt.

Pour que i soit égal au $^1/_{10}$, au $^1/_{100}$ ou au $^1/_{1000}$ de I, il faut que s soit le $^1/_9$, le $^1/_{99}$ ou le $^1/_{999}$ de g. Les galvanomètres sont fréquemment pourvus d'une boîte de shunts contenant trois bobines ayant les résistances relatives indiquées.

L'adjonction du shunt a pour effet de diminuer la constante du galvanomètre shunté dans le rapport $\frac{s}{s+g}$. Il est à remarquer que la résistance entre les bornes du galvanomètre passe alors de g à

$$\frac{g\,s}{g+s} = \frac{g}{m}.$$

S'il est nécessaire de maintenir la résistance du circuit invariable, on ajoute une *résistance de compensation*, égale à

$$g - \frac{g\,s}{g+s} = \frac{g^2}{g+s} = g\,\frac{m-1}{m}.$$

Lorsque les courants à mesurer sont très intenses, on emploie

comme shunt une barre ou mieux une bande métallique reliée au circuit par ses extrémités et sur laquelle on soude, en deux points intermédiaires, les deux fils allant au galvanomètre. Pour faire varier la constante de l'appareil ainsi shunté, l'on insère des résistances additionnelles en série avec le galvanomètre. Soit k' la constante du galvanomètre shunté, k étant celle du galvanomètre employé isolément. La résistance du shunt pouvant être négligée vis à vis de celle du galvanomètre, on a

$$k' = k \times \frac{s}{g}.$$

Si l'on ajoute une résistance r en série avec le galvanomètre, on obtient une nouvelle constante

$$k' = k \frac{s}{g + r}.$$

En faisant varier r, on étend convenablement la limite des courants mesurables.

Si, par exemple, on dispose de résistances étalons de 1, 0,1, 0,01, 0,001 et 0,0001 ohm, en dérivant sur ces résistances un galvanomètre sensible en série avec des résistances variables, il ne sera pas difficile d'arriver à mesurer des courants variant de 0,001 à 10 000 ampères.

L'emploi d'un shunt exige que le rapport de la résistance de ce dernier à celle du galvanomètre reste invariable. Il faut donc que l'un et l'autre soient en même métal et placés dans les mêmes conditions de température. En outre, il faut que le courant n'échauffe pas sensiblement ces appareils, vu la difficulté d'obtenir des échauffements égaux. Afin d'éviter des corrections pour la température, on peut adopter des bobines de galvanomètre et des shunts en un alliage tel que le maillechort ou la manganine. Mais les grandes résistibilités de ces alliages ne permettent pas de réaliser des galvanomètres très sensibles.

Si la densité du courant qui traverse le shunt est considérable, on empêche une élévation anormale de température en plongeant l'appareil dans un bain d'huile minérale qu'on refroidit, au besoin, par une enveloppe extérieure d'eau ou de glace.

M. Ayrton a indiqué un mode spécial d'emploi, comme shunt,

des résistances d'une boîte ordinaire graduée en ohms. Supposons que la résistance totale r de la boîte soit mise en circuit avec un galvanomètre de résistance g et que le courant I d'une pile se bifurque entre g et r. Le galvanomètre est traversé par un courant

$$i = I \frac{r}{r+g}.$$

Si, au lieu de réunir les fils d'amenée du courant aux extrémités de la résistance r, on les fixe à une résistance égale à $0,1\ r$ prise dans la boîte, les attaches du galvanomètre restant invariables et le courant total étant maintenu constant grâce à une résistance de compensation, le courant, dans l'instrument, devient

$$i' = I \frac{0,1\ r}{0,1\ r + g + 0,9\ r} = 0,1\ i.$$

De même, si le shunt est $0,01\ r$, on a

$$i'' = 0,01\ i.$$

Suivant que les courants à mesurer sont faibles ou intenses, on emploiera, dans ce système, des boîtes à grandes résistances ou des résistances faibles telles que des bandes de manganine partagées en parties égales.

Détermination de la constante d'un galvanomètre à l'aide d'un couple étalon. — Lorsqu'un galvanomètre doit être employé à la mesure de courants faibles, seul ou avec des shunts de résistances connues, on détermine le nombre de divisions de l'échelle correspondant à un micro-ampère par l'un des procédés suivants.

Le galvanomètre est mis en circuit avec une pile étalon, telle qu'un élément Clark, et une résistance très élevée, 100 000 ohms par exemple.

Soient g la résistance du galvanomètre, ρ celle de l'élément, r la résistance additionnelle, i l'intensité du courant, e la force électromotrice de l'étalon et δ le nombre de divisions lu sur l'échelle ;

$$i = \frac{e}{\rho + g + r} = \frac{\delta}{k},$$

d'où

$$k = \frac{\delta(\rho + g + r)}{e}.$$

Les résistances doivent être exprimées en mégohms, pour que le courant soit exprimé en micro-ampères. La résistance de l'élément et parfois même celle du galvanomètre peuvent être négligées devant r. On cherche à obtenir la déviation la plus grande possible pour réduire au minimum l'erreur relative de lecture, égale à l'erreur relative sur la constante, qu'elle entraîne.

Lorsqu'on ne dispose que d'une boîte de résistance allant jusqu'à 10 000 ohms, on utilise un élément peu polarisable ou un élément Clark de grandes dimensions. On dérive le galvanomètre sur une petite résistance r prise dans la boîte, en laissant en circuit avec la pile toutes les résistances disponibles r'. En désignant par i le courant dans le galvanomètre, par I le courant total, par E et ρ la force électromotrice et la résistance intérieure de l'élément,

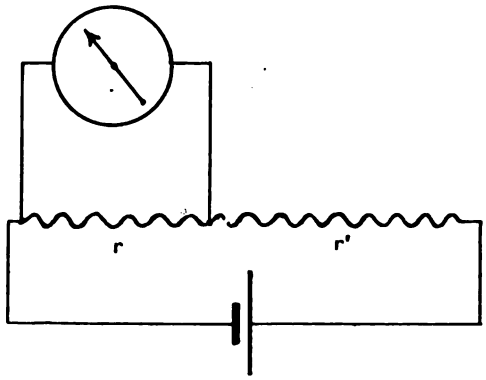


Fig. 60.

$$i = I\frac{r}{r+g} = \frac{E}{\rho + r' + \frac{rg}{r+g}} \times \frac{r}{r+g} = \frac{\delta}{k}.$$

Si r et ρ sont petits par rapport à g et r', on peut simplifier et écrire

$$i = \frac{E}{r'} \times \frac{r}{g} = \frac{\delta}{k}.$$

On choisira la résistance r de manière à obtenir la plus grande déviation δ possible et, suivant l'importance de l'erreur relative qu'on peut commettre dans la lecture du nombre de divisions, on appréciera ce qu'on peut négliger dans la formule.

La disposition qui vient d'être décrite est fréquemment employée pour obtenir une très faible différence de potentiel aux extrémités d'un galvanomètre ou d'un circuit.

Emploi du voltamètre pour le tarage des galvanomètres. — Lorsque les courants à mesurer sont de l'ordre d'un ampère, il est possible de graduer le galvanomètre pourvu de son shunt sans connaître la résistance du galvanomètre ni celle du shunt. On détermine la constante combinée du galvanomètre shunté en mesurant séparément l'intensité d'un courant au moyen du *voltamètre*.

Voltamètre à argent. — Le voltamètre à argent est le plus précis lorsqu'il est employé avec les précautions suivantes.

La cathode est une capsule en platine d'au moins 10 cm de diamètre et de 4 à 5 cm de profondeur. L'anode est une plaque d'argent pur de 30 cm^2 de surface et de 2 à 3 mm d'épaisseur, pour un courant d'un ampère ; elle est suspendue horizontalement dans l'électrolyte, près de la surface de celui-ci, par un fil de platine passant à travers des trous percés dans les coins de la plaque. Pour prévenir la chute sur la cathode de l'argent désagrégé de l'anode, celle-ci est enveloppée de papier à filtrer, maintenu par de la cire à cacheter. Le liquide doit consister en une solution neutre de nitrate d'argent contenant en poids 15 de nitrate pour 85 d'eau.

La résistance du voltamètre varie pendant la durée du passage du courant. En vue d'éviter que ses changements n'exercent un effet trop accentué sur le courant, il est utile d'ajouter dans le circuit une résistance additionnelle, de manière que la résistance totale ne soit pas inférieure à 10 ohms.

Pour préparer l'expérience, on commence par laver la capsule de platine à l'acide nitrique, puis à l'eau distillée; on la sèche à chaud et on la laisse refroidir dans un dessicateur avant de la peser. La capsule est alors remplie de la solution de nitrate et

placée sur un support en cuivre isolé, pourvu d'une borne. L'anode est immergée dans le liquide. On ferme le circuit à l'aide d'une clef et l'on note l'heure de l'établissement du contact. Le courant est maintenu pendant une demi-heure au moins. La solution est alors retirée et la capsule lavée à l'eau distillée et à l'alcool; on sèche le récipient dans une étuve à air, à la température d'environ 160° C. Après refroidissement dans un dessicateur, on pèse de nouveau. La différence des poids, en grammes, représente l'argent déposé; divisée par le nombre de secondes durant lesquelles le courant a passé et par 0,00118, elle exprime l'intensité moyenne en ampères.

Le courant doit être maintenu aussi constant que possible à l'aide de la résistance additionnelle, et la lecture du galvanomètre faite à des intervalles de temps rapprochés. Ces observations fournissent les éléments d'une courbe qui permet de déterminer la déviation correspondant au courant moyen.

Voltamètre à cuivre. — Pour la graduation des galvanomètres industriels, le voltamètre à cuivre est préféré au voltamètre à argent, parce que les substances employées sont moins chères et que la manipulation est plus commode.

La solution doit contenir du sulfate de cuivre purifié du commerce à une densité comprise entre 1,10 et 1,15. Le liquide est additionné de 5 pour 100 d'acide sulfurique. La présence de cet acide empêche l'altération des électrodes en cuivre qui se dissolvent à la longue dans la solution neutre. Dans le même but, on peut remplacer l'acide sulfurique par 5 pour 100 d'alcool.

Les électrodes en cuivre électrolytique doivent être découpées avec des appendices pour permettre la fixation aux attaches et avoir au moins 0,5 mm d'épaisseur. On fixe ces électrodes à des pinces à ressort disposées de manière qu'on puisse régler la surface immergée et détacher facilement les plaques pour la pesée. Les bords des plaques sont arrondis pour éviter la formation de dépôts peu adhérents sur les arêtes. Les plaques sont décapées dans l'eau acidulée d'acide nitrique, puis dans une solution d'acide sulfurique; on les rince alors dans l'eau distillée et dans l'alcool. On les pèse après les avoir desséchées dans un dessicateur. Il faut éviter de toucher avec les doigts les parties à immerger,

de crainte de nuire au dépôt. La densité du courant doit être d'environ 1 ampère par dm^2 de cathode. Si le courant est trop intense, le dépôt devient cristallin et peu adhérent. Le courant est réglé à l'aide d'un rhéostat. L'opération dure de 30 minutes à 1 heure. Lorsqu'on retire les électrodes, on les lave à l'eau légèrement acidulée d'acide sulfurique pour éviter l'oxydation, puis à l'alcool; on sèche et l'on repèse la cathode. Le calcul se fait comme dans le procédé précédent, en adoptant 0,0003287 pour l'équivalent électrochimique du cuivre.

Étude balistique du galvanomètre à aimant fixe et à champ radial. Mesure d'une décharge instantanée. — Le voltamètre fournit le moyen de mesurer une quantité d'électricité qui s'écoule sous forme de courant constant. Si la quantité d'électricité passe brusquement, comme c'est le cas dans la décharge d'un condensateur ou l'extra-courant d'une bobine, la méthode est en défaut. On fait alors passer le courant instantané dans un galvanomètre et l'impulsion de l'équipage mobile, mesurée par l'élongation lue sur l'échelle, permet d'évaluer la quantité d'électricité écoulée.

Avant d'exposer la méthode, il est nécessaire de faire brièvement l'étude des oscillations d'un galvanomètre soumis à l'action d'un couple déviant tel que celui produit par un courant instantané.

L'équation du mouvement s'obtient en écrivant que la dérivée par rapport au temps de la somme des moments des quantités de mouvement du système mobile est égale à la somme des moments des couples agissants

$$\frac{d}{dt}\,\Sigma\, mvr = \Sigma\, C.$$

Mais $v = \omega r$ et $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$, α étant l'angle de déviation du cadre à un moment quelconque. En appelant I le moment d'inertie de l'équipage mobile, on a donc

$$I\,\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \Sigma\, C.$$

Parmi les couples agissants figurent :

1° le couple accélérateur, qui, pour une valeur momentanée i du courant, est $\mathcal{K}si$;

2° le couple retardateur, développé par le fil de suspension. Ce couple est proportionnel à l'angle de torsion α, et peut être représenté par $c\alpha$;

3° les couples amortisseurs, dus au frottement du cadre contre l'air et aux courants induits qui se développent dans le système mobile par sa rotation dans le champ inducteur. Les frottements s'annulent avec la vitesse; ils peuvent être considérés comme proportionnels à celle-ci et, par suite, le couple correspondant être représenté par $f\frac{d\alpha}{dt}$.

Pour trouver l'expression de l'amortissement occasionné par les courants induits, on remarquera que la force électromotrice d'induction, due à la vitesse angulaire $\frac{d\alpha}{dt}$, est $\mathcal{H}sn\frac{d\alpha}{dt}$; en représentant par R la résistance du circuit et en négligeant la force contre-électromotrice très minime due à la self-induction du cadre, on a donc, pour la valeur du courant induit,

$$i_1 = \frac{\mathcal{H}\, s\, n}{R}\frac{d\alpha}{dt}.$$

Le couple dΩ à ce courant est

$$\mathcal{H}\, s\, n\, i_1 = \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{R}\frac{d\alpha}{dt}.$$

L'équation du mouvement devient ainsi, en faisant passer les couples antagonistes dans le premier membre,

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \left(f + \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{R}\right)\frac{d\alpha}{dt} + c\alpha = \mathcal{H}\, s\, n\, i. \quad (1)$$

Si l'on admet que le moment d'inertie du système mobile est suffisant pour que, pendant la durée τ, supposée très courte, du passage du courant, le cadre mobile ne se déplace pas d'une manière sensible, α est nul à la fin du temps τ; de sorte qu'en intégrant l'équation entre o et τ, après en avoir multiplié les termes par dt, il vient

$$I\frac{d\alpha}{dt} = \mathcal{H}\, s\, n \int_o^\tau i\,dt = \mathcal{H}\, s\, n\, q,$$

q désignant la quantité d'électricité qui a traversé le cadre galvanométrique.

Après le temps τ, le second membre de (1) s'annule et l'équation du mouvement devient

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2}+\left(f+\frac{\mathfrak{K}^2 s^2 n^2}{R}\right)\frac{d\alpha}{dt}+c\alpha=o.$$

Elle est de la forme

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2}+2a\frac{d\alpha}{dt}+b^2\alpha=o$$

si l'on pose

$$a=\frac{f}{2I}+\frac{\mathfrak{K}^2 s^2 n^2}{2RI}$$

$$b=\sqrt{\frac{c}{I}}.$$

C'est une équation linéaire sans second membre, qui est susceptible de donner des solutions de formes différentes, suivant que l'on a $a > b$ ou $a < b$.

Dans le premier cas, la solution générale est

$$\alpha=e^{-at}\left(Ae^{t\sqrt{a^2-b^2}}+Be^{-t\sqrt{a^2-b^2}}\right)$$

et dans le deuxième cas,

$$\alpha=e^{-at}\left(A\cos t\sqrt{b^2-a^2}+B\sin t\sqrt{b^2-a^2}\right).$$

Les facteurs A et B sont, dans les deux cas, des constantes d'intégration.

La première solution montre que le galvanomètre revient à sa position d'équilibre sans osciller; alors le mouvement est dit *apériodique*. Dans le deuxième cas, le système mobile effectue des oscillations d'amplitude décroissante avant de revenir au repos; le mouvement est *périodique*.

En posant $\sqrt{b^2-a^2}=\rho$, on peut écrire

$$\alpha=e^{-at}(A\cos t\rho+B\sin t\rho),$$

d'où

$$\frac{d\alpha}{dt}=e^{-at}\{(B\rho-Aa)\cos t\rho-(aB+\rho A)\sin t\rho\}.$$

Pour déterminer les constantes A et B, il suffit d'introduire, dans les deux équations précédentes, les conditions initiales du mouvement, à savoir $t = o$, $\alpha = o$ et

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\mathcal{K}\, s\, n\, q}{\mathrm{I}}.$$

On déduit de là

$$o = \mathrm{A}$$

$$\frac{\mathcal{K}\, s\, n\, q}{\mathrm{I}} = \mathrm{B}\rho.$$

En remplaçant A et B par leurs valeurs, on trouve pour α et $\frac{d\alpha}{dt}$ les expressions

$$\alpha = e^{-at} \frac{\mathcal{K}\, s\, n\, q}{\mathrm{I}\rho} \sin t\rho$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-at} \left(\frac{\mathcal{K}\, s\, n\, q}{\mathrm{I}} \cos t\rho - \frac{a\, \mathcal{K}\, s\, n\, q}{\mathrm{I}\rho} \sin t\rho \right).$$

La vitesse angulaire $\frac{d\alpha}{dt}$ du système mobile s'annule au temps t, pour lequel

$$\frac{\mathcal{K}\, s\, n\, q}{\mathrm{I}} \cos t\rho = \frac{a\, \mathcal{K}\, s\, n\, q}{\mathrm{I}\rho} \sin t\rho$$

ou

$$\operatorname{tang} t\rho = \frac{\rho}{a}.$$

De là l'on tire

$$\sin t\rho = \frac{\rho}{\sqrt{a^2 + \rho^2}}.$$

Par suite, la première élongation est donnée par la valeur de α dans laquelle on fait

$$t_1 = \frac{1}{\rho} \operatorname{arc\,tang} \frac{\rho}{a};$$

on obtient

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{K}\, s\, n\, q}{\mathrm{I}\rho} \frac{\rho}{\sqrt{a^2 + \rho^2}} e^{-\frac{a}{\rho} \operatorname{arc\,tang} \frac{\rho}{a}}.$$

La vitesse angulaire s'annule encore lorsque

$$\operatorname{tang} t_2 \rho = \operatorname{tang} (\pi + t_1 \rho)$$

c'est à dire pour

$$t_2 = \frac{\pi}{\rho} + t_1$$

et, d'une manière générale, pour

$$t_n = \frac{\pi}{\rho} + t_{n-1}.$$

On déduit de là, en additionnant les n valeurs de t,

$$t_n = \frac{\pi}{\rho}(n-1) + t_1.$$

La n^e élongation a pour amplitude

$$\alpha_n = e^{-at_n} \frac{\mathcal{K} s n q}{I \rho} \sin \left\{ \pi (n-1) + t_1 \rho \right\}$$

$$= \alpha_1 e^{-a(n-1)\frac{\pi}{\rho}}.$$

Ces résultats montrent que le mouvement du cadre est isochrone, la durée d'une demi-oscillation étant $\frac{\pi}{\rho} = T$.

L'amplitude des oscillations décroît suivant les termes d'une progression géométrique dont la raison est e^{-aT}.

L'exposant $\lambda = aT$, pris positivement, s'appelle le *décrément logarithmique* des oscillations parce qu'il est le logarithme népérien du rapport des amplitudes de deux oscillations successives ; en effet

$$\lambda = \log_e \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}.$$

On peut exprimer les coefficients a et b en fonction des valeurs λ et T qui résultent directement de l'observation.

On a, en effet,

$$a = \frac{\lambda}{T} = \frac{f}{2I} + \frac{\mathcal{K}^2 s^2 n^2}{2IR}$$

$$b = \frac{I}{T}\sqrt{\lambda^2 + \pi^2} = \sqrt{\frac{c}{I}}$$

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{K} s n q}{I} \frac{T}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}} e^{-\frac{\lambda}{\pi} \text{ arc tang } \frac{\pi}{\lambda}}.$$

Dans le cas particulier où les couples amortisseurs sont nuls, $a = o$ et $\lambda = o$. La durée d'une demi-oscillation est alors

$$T_0 = \frac{\pi}{b}$$

d'où

$$T = T_0 \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2}}.$$

On peut écrire, dans le cas où le mouvement est amorti,

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{H} sn q}{I} \frac{T_0}{\pi} e^{-\frac{\lambda}{\pi} \text{ arc tang } \frac{\pi}{\lambda}}$$

On déduit de ce qui précède la mesure de la quantité d'électricité qui s'est écoulée dans la décharge instantanée

$$q = \frac{I}{\mathcal{H} sn} \frac{\pi}{T_0} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \text{ arc tang } \frac{\pi}{\lambda}} \qquad (2)$$

Si l'amortissement est pratiquement nul, ce qui est le cas lorsque le galvanomètre est placé sans shunt dans le circuit d'un condensateur et que la résistance de l'air est très petite, on a simplement

$$q = \frac{I}{\mathcal{H} sn} \frac{\pi}{T_0} \alpha_1.$$

Si l'amortissement est faible, on ne commet pas d'erreur sensible en admettant que les oscillations décroissent suivant les termes d'une progression arithmétique, c'est à dire qu'entre les lectures consécutives α_1 et α_3 relevées du même côté du zéro, il y a 4 demi-oscillations simples dont les amplitudes successives diffèrent entr'elles d'intervalles angulaires égaux à $\frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}$. Il en résulte que l'élongation première, corrigée de l'amortissement, est alors

$$\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}.$$

Dans ce cas, on a

$$q = \frac{I}{\mathcal{H} sn} \frac{\pi}{T_0} \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}\right).$$

Constante balistique. Coefficient de sensibilité du galvanomètre. — Dans l'expression générale (2), qui peut être mise sous la forme

$$q = \frac{1}{K} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\lambda}},$$

le facteur K, qui représente la déviation en radiants pour l'unité électromagnétique de quantité, s'appelle la *constante balistique* du galvanomètre par opposition à la constante pour le courant permanent, définie par

$$i = \frac{c\,\delta}{\mathcal{K}\,s\,n} = \frac{\delta}{k},$$

d'où

$$k = \frac{\mathcal{K}\,s\,n}{c} = \frac{\mathcal{K}\,s\,n}{I} \frac{T_0^2}{\pi^2}.$$

Cette équation permet d'éliminer de l'équation (2) le facteur $\frac{I}{\mathcal{K}\,s\,n}$, généralement inconnu. On a

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{i}{\delta} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}} = \frac{T}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}} \frac{1}{k} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}}$$

$$= \frac{1}{K} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\lambda}}. \qquad (3)$$

Par la comparaison des dernières équations, on trouve, entre la constante balistique et la constante permanente d'un même galvanomètre, la relation curieuse

$$\frac{K}{k} = \frac{\pi}{T_0} = \frac{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}}{T}.$$

Si k se rapporte au micro-ampère, K est relatif au microcoulomb.

Ce résultat permet de déduire la constante balistique de la constante permanente, de l'observation de la durée d'une oscillation et du décrément logarithmique.

Pour estimer la durée d'une oscillation simple, on lance dans le galvanomètre la décharge d'un condensateur et l'on fait partir un compte-secondes lors du premier passage de la bobine par la

position d'équilibre ou par l'une des positions extrêmes ; on compte le nombre d'oscillations simples ou le nombre d'oscillations doubles et l'on arrête le compte-secondes après 5, 10 ou 20 oscillations, suivant la rapidité de celles-ci.

Pour obtenir le décrément logarithmique, on note les lectures correspondant à des séries de 5, 10, 20 oscillations complètes. Le décrément est le logarithme népérien du rapport des déviations extrêmes, divisé par le nombre d'oscillations observées. De T et λ on déduit la période d'oscillation T_0 sans amortissement.

Enfin, si l'on désire déterminer le moment d'inertie du système mobile, on adjoint à l'équipage du galvanomètre une masse, telle qu'un balancier portant deux contrepoids, dont le moment d'inertie I′ est calculable. En faisant osciller le cadre seul, on avait

$$T_0 = \pi \sqrt{\frac{I}{c}};$$

avec la masse supplémentaire, on obtient

$$T_0' = \pi \sqrt{\frac{I + I'}{c}},$$

d'où

$$I = \frac{T_0^2}{T_0'^2 - T_0^2} I'.$$

En général, il est plus simple et plus précis de déterminer directement la constante balistique en envoyant, dans le galvanomètre, la décharge d'un condensateur de capacité connue chargé à l'aide d'une pile étalon.

Le plus souvent on compare les galvanomètres entr'eux d'après les constantes permanentes ou les constantes balistiques et sans s'occuper de la rapidité des lectures, qui est cependant un élément important au point de vue de l'usage de ces appareils et qui dépend de la période d'oscillation du cadre. Pour en tenir compte, M. Armagnat propose d'appeler *coefficient de sensibilité* d'un galvanomètre à miroir la déviation produite par un courant de 1 micro-ampère, l'échelle étant placée à une distance du miroir égale

à la longueur de 1000 de ses divisions et la durée d'oscillation du système mobile étant de 1 seconde sans amortissement. La formule

$$k = \frac{\mathcal{K}\, sn}{I}\,\frac{T_0^2}{\pi^2}$$

permet de ramener les constantes à une même période.

Résistance critique. — Si l'on fait osciller un galvanomètre Deprez et d'Arsonval, pourvu d'un shunt, le mouvement reste périodique tant que la résistance du shunt est suffisante pour que les courants induits ne déterminent pas un amortissement trop considérable. Lorsque le shunt décroît, le décrément logarithmique augmente. Il arrive un moment où la seconde élongation est nulle. Ce cas correspond à la condition $a = b$, soit

$$\frac{f}{2I} + \frac{\mathcal{K}^2 s^2 n^2}{2RI} = \sqrt{\frac{c}{I}}.$$

Dans ces conditions, l'amortissement dû à la résistance de l'air peut être négligé devant l'amortissement dû au couple électromagnétique. On a donc

$$R = \frac{\mathcal{K}^2 s^2 n^2}{2I}\sqrt{\frac{I}{c}} = \frac{\mathcal{K}^2 s^2 n^2}{2I}\,\frac{T_0}{\pi},$$

valeur qui représente la résistance critique du circuit galvanométrique correspondant à la cessation des oscillations périodiques de l'équipage mobile. A l'aide de cette relation, on peut vérifier les résultats obtenus pour $\mathcal{K}sn$ et c d'après les observations de T, λ et I.

Influence de la durée de la décharge. — La théorie qui précède suppose que la décharge qui traverse le galvanomètre a une durée négligeable devant la période d'oscillation de l'instrument. S'il n'en est pas ainsi, l'élongation commence avant la fin de la décharge et diffère de la valeur trouvée précédemment d'une quantité variable avec le rapport $\frac{T}{\tau}$. Les différences peuvent être trouvées expérimentalement en déchargeant un condensateur dans un galvanomètre dont on connaît la période T, à circuit ouvert.

En variant la résistance du circuit, on peut obtenir des durées de décharge calculables par la formule

$$\tau = CR \log_e \frac{1}{n}$$

C étant la capacité du condensateur, R la résistance du circuit de décharge et n la fraction de la charge primitive qui reste après le temps τ (1). En admettant que cette fraction est $^1/_{100}$ et en négligeant la charge résiduelle, M. Ledeboer (2) a trouvé, avec un galvanomètre Deprez et d'Arsonval, une différence de 15 pour 100 quand la durée de la décharge équivaut à la durée d'une oscillation du cadre, de 5 pour 100 lorsque la durée de la décharge est la moitié de celle d'une oscillation et de 1 pour 100 quand le rapport $\frac{T}{\tau} = 5$.

Répétition de la décharge pour obtenir une élongation renforcée. — Il est possible, en répétant périodiquement la décharge au moment où le cadre mobile repasse par la position d'équilibre, d'obtenir une élongation renforcée, dont on peut déduire la quantité d'électricité correspondant à une décharge.

Supposons que ω soit la vitesse angulaire initiale communiquée au cadre par la première décharge. Au moment où le système oscillant repasse par cette position après avoir accompli une oscillation complète, la vitesse angulaire est affaiblie. Elle peut être représentée par $m\omega$, m étant un coefficient d'autant plus petit que l'amortissement est plus grand. Si, à l'instant considéré, on lance dans le cadre une nouvelle décharge, la vitesse angulaire nouvelle est $\omega + m\omega = \omega(1 + m)$. En répétant une seconde fois cette opération, on obtient $\omega(1 + m + m^2)$. Si l'on continue de même, la vitesse tend vers une limite

$$\omega(1 + m + m^2 + \ldots) = \frac{\omega}{1 - m}.$$

Si $m = 0{,}90$, l'élongation limite est décuple de la première.

---

(1) ERIC GERARD. *Leçons sur l'Electricité*, 4e édition, § 112.

(2) LEDEBOER, *Lum. Electr.*, 26 juin 1886.

Mesure d'une décharge électrique à l'aide d'un galvanomètre pourvu d'un shunt. — Si la quantité d'électricité transportée par la décharge occasionne une élongation sortant des limites de l'échelle, il est nécessaire de disposer un shunt entre les bornes du galvanomètre. Désignons par £ le coefficient de self-induction du cadre mobile, et supposons nuls celui du shunt et le coefficient d'induction mutuelle du shunt et du galvanomètre. En appelant I l'intensité du courant de décharge à un moment quelconque, i et i' les courants dérivés dans le galvanomètre et dans le shunt, on a, en vertu des lois de Kirchhoff,

$$I = i + i'$$

$$ig - i's = -\pounds \frac{di}{dt}.$$

Pour résoudre ces équations, deux cas sont à considérer :

1° La bobine mobile ne se déplace pas pendant la durée τ de la décharge. On a alors, en multipliant les deux équations par dt, en intégrant entre les limites de temps o et τ de la décharge et en appelant Q, q, q' les quantités d'électricité de la décharge totale, de la décharge dans le galvanomètre et de celle qui traverse le shunt,

$$Q = q + q'$$

$$gq - sq' = -\pounds \int_{i=o}^{i=o} di = o,$$

attendu que le courant est nul au commencement et à la fin de la décharge.

Il résulte de ce qui précède qu'alors

$$q = Q \frac{s}{s+g},$$

c'est à dire que le partage se fait comme dans le cas des courants permanents.

2° Si la bobine se déplace pendant la décharge, il faut faire entrer en ligne de compte la force électromotrice due au flux magnétique coupé par la bobine mobile pendant ce déplacement initial. Il semble naturel d'admettre que ce flux est proportionnel

à l'élongation finale, c'est à dire que l'angle β décrit pendant le temps τ est proportionnel à l'élongation α. Le nombre de lignes de force coupées pendant le temps τ peut alors être figuré par

$$\mathfrak{N} = A\beta = B\alpha.$$

Dans ce cas, la seconde loi de Kirchhoff donne

$$ig - i's = -\mathfrak{L}\frac{di}{dt} - \frac{d\mathfrak{N}}{dt} = -\mathfrak{L}\frac{di}{dt} - A\frac{d\beta}{dt}.$$

En multipliant par dt et en intégrant, il vient

$$\int_o^\tau i\,g\,dt - \int_o^\tau i's\,dt = -\mathfrak{L}\int_{i=o}^{i=o} di - A\int_o^\beta d\beta,$$

ou, vu que la répartition de la décharge est différente de celle calculée dans le premier cas,

$$g\,q_1 - s\,q'_1 = -A\beta = -B\alpha = -M\,q_1$$

car q_1 est proportionnel à α.

Par suite

$$\frac{q_1}{q'_1} = \frac{s}{g+M}$$

et

$$\frac{q_1}{Q} = \frac{s}{s+g+M}.$$

L'influence du shunt équivaut donc, dans ce cas, à un accroissement apparent de la resistance du galvanomètre. Cet accroissement M doit être déterminé expérimentalement pour diverses valeurs du shunt, car l'observation montre qu'il ne peut être considéré comme constant qu'entre des limites assez restreintes. Pour la détermination de M, on considère les premières élongations, sans correction pour l'amortissement.

Lorsqu'on décharge un condensateur dans un galvanomètre shunté suivant la méthode de M. Ayrton, l'amortissement est indépendant du fractionnement du courant de décharge, attendu que le circuit du galvanomètre conserve une résistance invariable.

Chapitre VII.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE.

Galvanomètres des tangentes. — L'intensité du champ magnétique au centre d'un cadre circulaire pourvu d'une bobine de fil dont les spires sont rapprochées comparativement à la longueur du rayon du cadre, est

$$\frac{2\pi n i}{r}$$

lorsqu'un courant d'intensité i parcourt la bobine.

Si l'on oriente le cadre dans le méridien magnétique et si l'on suspend au centre une aiguille de très petites dimensions, de moment magnétique $\mathcal{M}$, l'aiguille dévie d'un angle α déterminé par l'égalité des couples dûs au champ magnétique terrestre, dont l'intensité horizontale est $\mathcal{H}$, et à l'action du courant

$$\frac{2\pi ni}{r}\mathcal{M}\cos\alpha = \mathcal{H}\mathcal{M}\sin\alpha,$$

d'où

$$i = \frac{\mathcal{H} r}{2\pi n}\operatorname{tang}\alpha.$$

Si les facteurs du second membre sont exprimés en unités C. G. S., l'intensité est donnée en ampères par la formule

$$i = \frac{5\mathcal{H} r}{\pi n}\operatorname{tang}\alpha.$$

L'intensité horizontale du champ terrestre est fournie par une mesure indépendante (voir chap. XIX) ou par les tables magné-

tiques. Si l'on se sert du nombre $\mathfrak{K}$ pris dans des tables, au lieu de déterminer sur place l'intensité du champ, il faut installer le

Fig. 61.

galvanomètre dans un local dépourvu d'aimants et de courants qui pourraient modifier les constantes magnétiques.

Il faut veiller à ce que, dans la construction du galvanomètre lui-même, il n'entre pas de corps magnétiques. Les champs parasites limitent beaucoup l'emploi du galvanomètre des tangentes pour les mesures industrielles.

Dans les mesures précises, divers facteurs de correction doivent intervenir pour tenir compte de l'écartement des spires et de la longueur de l'aiguille.

La correction due à l'écartement des spires est la moins importante. Elle peut même être éliminée si l'on adopte une bobine de section rectangulaire présentant une longueur suivant l'axe égale à l'épaisseur de l'enroulement multipliée par 0,8. Si la longueur est égale à l'épaisseur et si ces deux dimensions mesurent le dixième du rayon de la bobine, l'erreur atteint seulement 0,05 pour 100.

L'erreur causée par la longueur de l'aiguille ne dépasse pas 0,5 pour 100, si cette longueur n'est pas supérieure au vingtième du rayon du cadre. L'erreur est nulle pour une déviation de 26° environ.

On a vu, d'autre part, qu'une mesure faite au galvanomètre des tangentes présente l'erreur relative minima lorsque la déviation est voisine de 45°. Lorsqu'on fait des lectures directes, on règle les expériences de manière à obtenir des déviations comprises entre 20° et 70°; les intensités limites des courants mesurés sont alors dans le rapport de 1 à 7,5.

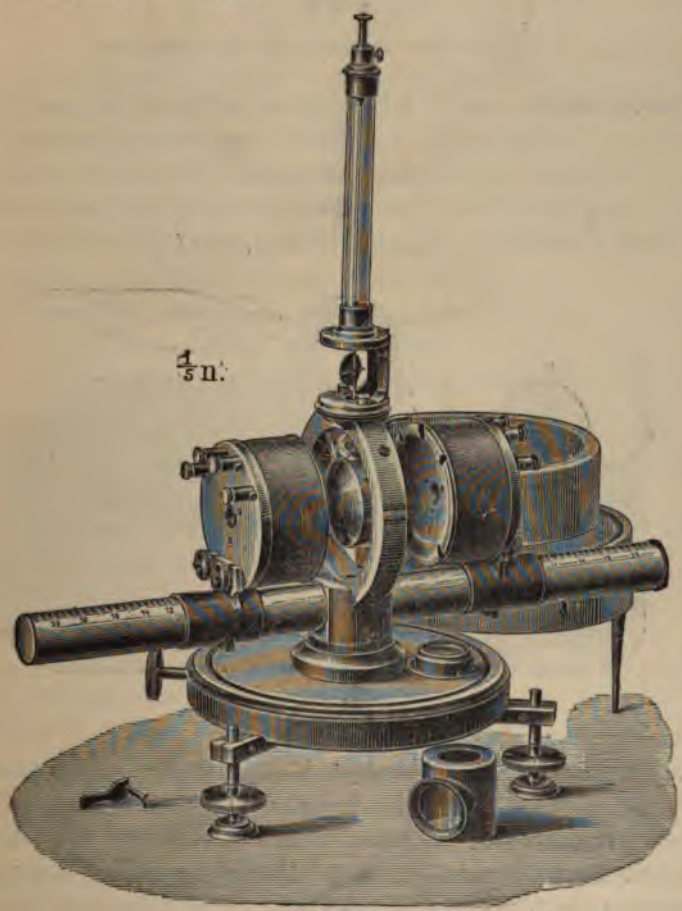


Fig. 62.

Système Wiedemann. — Dans le galvanomètre de Wiedemann (fig. 62), l'aiguille aimantée est suspendue par un long fil de cocon, attaché à une tête de torsion, entre deux bobines mobiles sur des glissières orientées normalement à la direction du méridien. On peut ainsi faire varier la sensibilité de l'appareil. Des bobines de rechange permettent la mesure de courants d'intensités très différentes. En appelant d la distance moyenne des spires à l'aiguille, on a la formule

$$i = \mathcal{K}\,\frac{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi\, r^2 n}\,\operatorname{tang}\alpha.$$

Les lectures se font par la méthode de réflexion.

Système Kelvin. — Le galvanomètre industriel de Lord Kelvin repose sur le même principe. L'aiguille est supportée par un pivot dans une boîte mobile suivant l'axe de la bobine B. Les lectures se font directement à l'aide d'un index en aluminium *mn* qui se déplace au dessus d'un miroir destiné à éviter l'erreur de parallaxe.

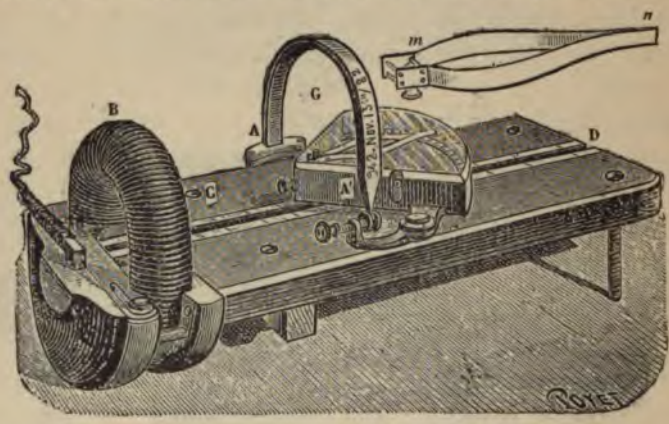


Fig. 63.

Le cadran est gradué de manière à indiquer directement la valeur de la tangente de l'angle de déviation ; il suffit de multiplier la lecture par une constante pour obtenir la valeur de l'intensité du courant. Dans l'appareil de Lord Kelvin un aimant A peut être employé pour accroître le champ directeur et diminuer l'influence des champs parasites.

Système Obach. — Un autre artifice permettant de mesurer des courants d'intensités très différentes a été suggéré par M. Obach.

Le cadre est mobile autour d'un axe horizontal. En changeant son inclinaison, on peut affaiblir l'effet du courant sur l'aiguille. En appelant β l'inclinaison du cadre sur la verticale, on a l'égalité des couples

$$\frac{2\pi i n}{r}\,\mathcal{A}\cos\alpha\cos\beta = \mathcal{H}\,\mathcal{A}\sin\alpha$$

d'où

$$i = \frac{\mathcal{H} r}{2\pi n}\,\frac{\operatorname{tang}\alpha}{\cos\beta}.$$

Correction pour la torsion des fils de suspension. — Dans les galvanomètres des tangentes destinés aux expériences de haute précision, dans lesquelles on mesure des courants faibles, les lectures se font par réflexion et l'aimant est suspendu par des fils de cocon ou de quartz. Dans ce cas, il y a lieu de tenir compte du couple de torsion $d\hat{u}$ au fil de suspension. Pour permettre la détermination de ce couple, le fil est porté par une tête de torsion, c'est à dire par un treuil qui peut tourner autour d'un axe vertical. On suspend d'abord l'aimant sans torsion. Pour cela, on commence par substituer à l'aimant un barreau de métal non magnétique qu'on oriente dans le plan méridien à l'aide de la tête de torsion. On remplace ensuite le barreau neutre par l'aimant et l'on tourne le treuil d'un angle δ lu sur le cercle gradué de la tête de torsion. A cause de la raideur du fil, l'aiguille dévie d'un angle δ' de même sens, de sorte que la torsion du fil se réduit à $\delta - \delta'$.

Le couple de torsion est

$$c\,(\delta - \delta') = \mathcal{H}\,\mathcal{A}\sin\delta'$$

ou simplement $\mathcal{H}\,\mathcal{A}\,\delta'$ pour un angle faible.

L'effet de la torsion peut donc être considéré sensiblement comme un accroissement de la composante $\mathcal{H}$ dans le rapport de

$$1 \text{ à } 1 + \frac{\delta'}{\delta - \delta'} = (1 + \theta).$$

Le rapport θ est appelé rapport de torsion. On a définitivement

$$i = \frac{\mathcal{H}(1+\theta) r}{2\pi n}\operatorname{tang}\alpha.$$

Mesure d'une décharge instantanée à l'aide du galvanomètre à aimant mobile. — Supposons qu'une quantité d'électricité q traverse le multiplicateur d'un galvanomètre à aimant mobile avec une rapidité telle que l'aiguille ne se déplace pas d'un angle appréciable pendant la décharge. On choisira pour cela un galvanomètre dont l'aiguille présente un moment d'inertie suffisant. En raisonnant comme on l'a fait au sujet du galvanomètre à bobine mobile, on arrive à l'expression

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{\mathcal{H}\, r}{2\pi n} \alpha_1 \, e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}}$$

ou encore, si l'amortissement est faible,

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{r\,\mathcal{H}}{2\pi n} \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}\right).$$

Si la quantité d'électricité donnait une élongation trop grande, on pourrait employer un shunt, mais il faudrait avoir soin de calculer le décrément logarithmique avec ce shunt, parce que l'amortissement dû aux courants induits par l'aimant dans la bobine dépend de la résistance du shunt. Si l'on ne calcule pas le décrément logarithmique, on peut estimer le terme de correction par la méthode déjà indiquée.

Les galvanomètres à aiguille lourde peu amortis oscillent longtemps avant de revenir au zéro ; pour les arrêter, on envoie dans la bobine le courant d'une pile au moment où l'aiguille repasse par le zéro. En réglant convenablement le sens et l'intensité du courant, on peut arrêter à peu près brusquement l'aiguille.

Moyens employés pour développer la sensibilité des galvanomètres à aimant mobile. — *Forme à donner à la bobine.* Le galvanomètre des tangentes est peu sensible par suite de l'écartement qui sépare le multiplicateur et l'aimant. Aussi n'est-il guère employé dans les essais de précision que pour la mesure absolue des courants. Pour accroître sa sensibilité, il faut diminuer la distance des spires à l'aimant. Dans ce cas, la relation qui lie l'intensité du courant à la déviation est fort complexe et, en général, indéterminée.

Si l'on développe la fonction inconnue $i = f(\alpha)$ suivant la série de Mac-Laurin, on obtient

$$i = f(o) + \frac{\alpha}{1} f'(o) + \frac{\alpha^2}{1.2} f''(o) + \ldots$$

La fonction doit s'annuler avec α ; d'où il résulte que $f(o) = o$. De plus, si la déviation est très faible, on est autorisé à négliger le 3e terme ainsi que les suivants, et à admettre que l'intensité est proportionnelle à la déviation

$$i = k\,\alpha.$$

Le coefficient k, qui constitue le facteur de réduction du galvanomètre, se détermine en envoyant dans ce dernier un courant d'intensité connue.

Afin de déterminer la forme la plus avantageuse à donner à la bobine en vue d'économiser le fil et de diminuer la résistance du cadre, reprenons l'expression de l'intensité du champ dû à un courant circulaire de rayon R en un point de l'axe situé à une distance r

$$\mathfrak{H} = 2\pi i \frac{R^2}{(R^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Si l'on pose $\mathfrak{H}$ = constante, et si l'on considère R et r comme variables, on obtient l'équation d'une courbe présentant deux parties symétriques (fig. 64).

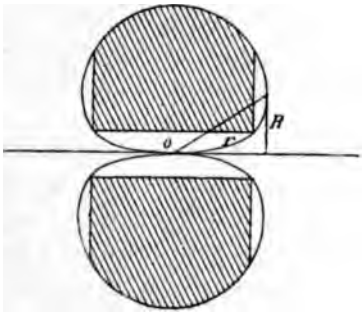


Fig. 64.

L'aire limitée par cette courbe est la section méridienne d'un volume de révolution suivant lequel on peut enrouler le fil. Toutes

les spires remplissant un tel volume ont sur l'unité de pôle centrale une action au moins égale à $\mathfrak{K}$. Toutes les spires extérieures à ce volume ont une action moindre. La section hachurée de la figure 64, qui ménage une cavité cylindrique pour loger l'aiguille, représente donc la forme rationnelle de la bobine d'un galvanomètre de grande sensibilité. Lord Kelvin s'est rapproché le plus possible de cette forme dans la construction de ses galvanomètres.

Dispositions d'aimants. Nous avons vu que la déviation obtenue au galvanomètre des tangentes est indépendante du moment magnétique de l'aiguille. On pourrait donc à la rigueur se contenter d'une aiguille en fer doux qui s'aimanterait sous l'action combinée du magnétisme terrestre et du courant. Mais, dans les conditions présentes, ce système présenterait des inconvénients graves. Les forces agissantes étant faibles, les oscillations seraient très lentes et le rapport de torsion considérable. De plus, la position de l'axe magnétique varierait dans l'aiguille, de sorte que les déviations lues sur l'échelle n'exprimeraient pas véritablement les angles de l'axe magnétique avec la position de repos.

Pour ces raisons, on emploie, dans les galvanomètres destinés à la mesure des courants faibles, des aiguilles aimantées aussi fortement que possible, pour que leur magnétisme ne varie pas sous l'action du courant.

On peut accroître la déviation provoquée par l'action électromagnétique en diminuant l'action directrice de la terre sur l'aiguille

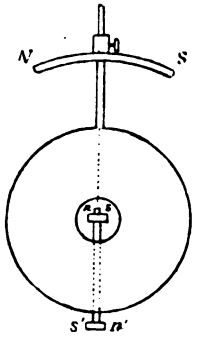


Fig. 65.

mobile. Il y a deux moyens d'arriver à ce but (fig. 65). A la tige qui supporte l'aiguille et qui traverse le multiplicateur, on fixe une

seconde aiguille, orientée en sens inverse de la première. En choisissant des aiguilles de moments magnétiques peu différents, on diminue autant qu'on veut le couple directeur dû à la terre. Un tel système d'aiguilles est dit *astatique* M. Weiss est arrivé à établir un système astatique présentant un faible moment d'inertie, en employant deux aimants verticaux identiques ayant leurs pôles de noms contraires accolés. On forme ainsi un circuit magnétique qui s'oppose à la désaimantation des barreaux.

L'action terrestre peut également être modifiée par un aimant directeur N S, fixé au dessus de l'aiguille. En changeant la position et l'orientation de cet aimant, il est possible de diminuer ou d'augmenter à volonté l'effort directeur.

Le système astatique avec aimant directeur a l'avantage de rendre l'équipage mobile moins sensible aux influences magnétiques extérieures.

Dans les appareils très sensibles employés avec un système astatique, chacun des aimants qui composent celui-ci est entouré d'un multiplicateur.

Lorsque les galvanomètres sont destinés à la mesure des courants très faibles qui traversent les corps peu conducteurs, on compose les multiplicateurs d'un grand nombre de spires dont la résistance totale dépasse parfois 20 000 ohms. Il faut alors isoler, avec le plus grand soin, toutes les parties du circuit électrique. Les bobines et les bornes sont portées par des supports ou des colonnettes en ébonite. Les appareils sont enfermés dans des cages dont l'atmosphère intérieure est desséchée par des moyens chimiques.

En utilisant les dispositifs précédents, on obtient des galvanomètres donnant jusque 10 000 divisions par micro-ampère, l'échelle étant placée à une distance du miroir égale à 1 000 divisions. A la valeur de la constante, on joint celle de la période d'oscillation pour caractériser un tel appareil.

Ces galvanomètres très sensibles sont surtout employés pour la mesure des résistances d'isolement et les mesures bolométriques. On peut réaliser, pour ces mesures, des galvanomètres du genre Deprez et d'Arsonval qui ont également une sensibilité très élevée.

Amortissement du mouvement du système mobile. — On recherche, pour les mesures de précision, non seulement des galvanomètres très sensibles, mais des appareils qui permettent

Fig. 66.

des lectures rapides. Pour cela, on amortit le mouvement des aiguilles. Les moyens employés sont d'ordre mécanique et d'ordre électrique.

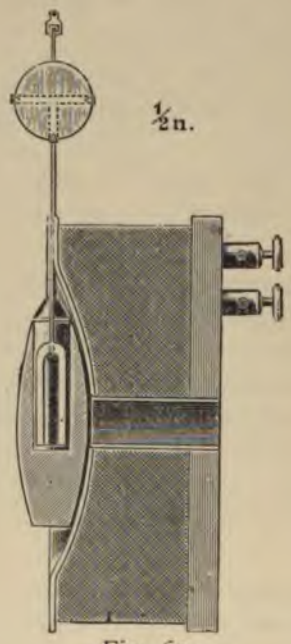


Fig. 67.

Les aiguilles et leurs suspensions sont naturellement amorties par la résistance que l'air oppose à leur mouvement. On peut augmenter cette résistance en fixant, à l'aiguille, une palette se déplaçant dans un espace confiné, où il se produit des remous d'air qui amortissent rapidement les oscillations.

Dans quelques galvanomètres de Lord Kelvin, l'aiguille est fixée au dos d'un petit miroir soutenu par un fil court dans un cylindre de cuivre, entre deux glaces très rapprochées. Si l'espace entre le miroir et le cylindre est suffisamment faible, le système est apériodique (dead beat), fig. 66.

On a aussi recours à des flotteurs plongeant dans la glycérine, mais la viscosité du liquide ne permet pas de se servir de ce moyen pour les appareils dans lesquels les couples directeurs sont faibles.

L'amortissement électrique est obtenu en profitant du couple retardateur développé par des courants induits occasionnés par le déplacement des aimants mobiles. Si le circuit galvanométrique est fermé, il y a un amortissement dû aux courants induits produits dans le multiplicateur. Siemens a réalisé un amortissement plus efficace en donnant à l'aimant la forme d'une cloche fendue, forme qui a l'avantage de rapprocher les pôles et de mieux retenir le magnétisme. Cet aimant est logé dans une masse de cuivre où l'on a percé, à cet effet, une cavité cylindrique, fig. 67. On obtient de la sorte des courants d'induction relativement intenses qui provoquent un amortissement rapide des oscillations.

Galvanomètre de torsion de Siemens et Halske. — Le galvanomètre suivant, très usité en Allemagne, permet des lectures directes

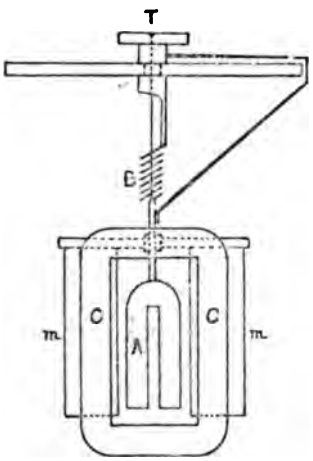


Fig. 68.

entre des limites très étendues. L'aimant mobile A, en forme de cloche, est supporté par un fil de cocon dans un cadre multiplicateur CC. Il est dirigé par un ressort à boudin B pourvu, à la partie supérieure, d'une tête de torsion T. Les mouvements sont amortis par des ailettes en mica *mm* portées par l'équipage mobile.

Lorsque l'aimant est dévié sous l'action du courant, on le ramène au zéro, que pointe un index, grâce à une torsion α lue sur un cercle gradué.

On a la relation

$$i = \frac{\alpha}{k},$$

k étant une constante à déterminer par expérience. Il est à remarquer que, comme l'aimant est toujours ramené à la même position, le couple équilibré par la torsion ne dépend que de l'intensité du courant et du moment de l'aimant. Il est indépendant des champs extérieurs, à la condition que ceux-ci ne soient pas assez intenses pour modifier le moment magnétique de l'aimant mobile.

Le ressort directeur peut être tordu de 360° sans que la limite d'élasticité soit dépassée, ce qui permet la mesure de courants très différents. On peut encore étendre les limites d'emploi de l'appareil en utilisant des shunts combinés au besoin avec des résistances mises en série avec le galvanomètre.

Chapitre VIII.

GALVANOMÈTRES ET AMPÈREMÈTRES DIVERS.

Galvanomètre différentiel. Modèle de Lord Kelvin. Modèle de l'auteur. Réglage et applications. — Toutes les méthodes de mesure du courant électrique étudiées précédemment sont des méthodes absolues (cas du galvanomètre des tangentes) ou des méthodes par comparaisons successives (cas d'un galvanomètre gradué à l'aide d'un courant connu). Il existe aussi une méthode de réduction à zéro, permettant la comparaison des courants et basée sur l'emploi du *galvanomètre différentiel*.

Cet appareil comporte deux multiplicateurs parcourus par les courants à comparer et dont les actions électromagnétiques sont antagonistes.

Le modèle de Lord Kelvin, construit par M. Carpentier, possède un système astatique orienté par un aimant directeur. L'équipage mobile est porté par un fil de cocon ou de quartz. Il comprend une tige en aluminium portant, à la partie supérieure, un petit miroir concave sur le dos duquel sont fixés des fragments de ressort de montre fortement aimantés. La partie inférieure porte un nombre égal de petits aimants dont les pôles sont orientés en sens inverse. Une palette en aluminium sert d'amortisseur à air.

Deux paires de bobines indépendantes entourent les deux groupes d'aimants. Ces bobines tournent sur charnières, afin de permettre de découvrir l'équipage mobile. Les deux paires de bobines agissent en sens contraires sur les aimants qu'elles

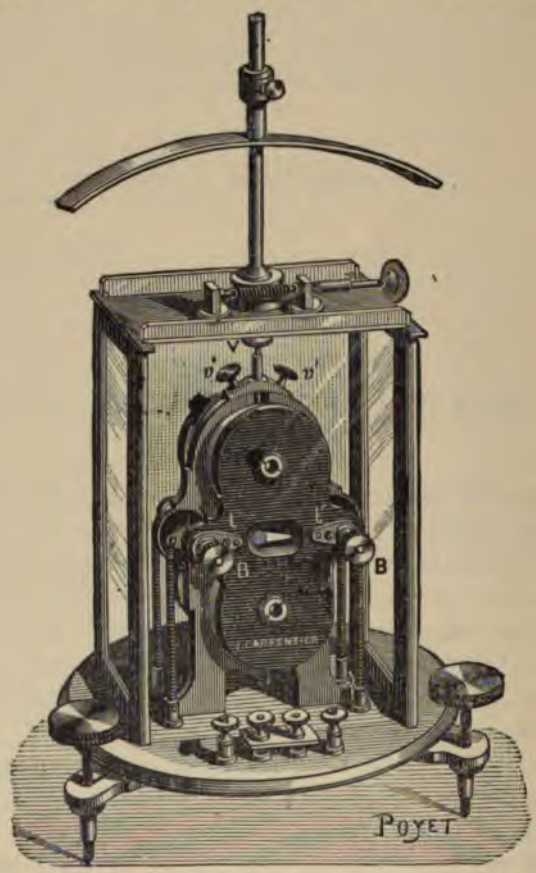


Fig. 69.

entourent. Dans certains appareils, une petite bobine supplémentaire insérée dans un des circuits sert à compenser la prédominance éventuelle de l'autre circuit. Pour cela, cette bobine de réglage peut être éloignée ou rapprochée des aimants supérieurs.

L'appareil est porté par un socle en ébonite, sur vis calantes et

est pourvu d'un niveau à bulle centrale et de 4 bornes, 2 par circuit. Il est renfermé dans une cage en verre ou en métal.

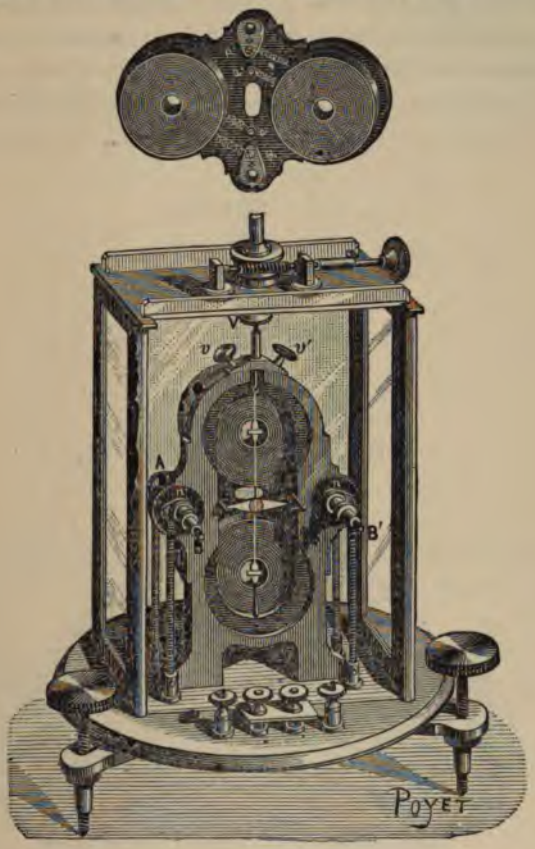


Fig. 70.

L'auteur a rendu différentiel le galvanomètre Deprez et d'Arsonval par le dispositif suivant (fig. 70). Le cadre mobile comprend deux bobines semblables, parcourues par le courant en sens inverses et suspendues à un fil de cocon, autour duquel est disposé un ressort métallique à boudin qui donne accès au courant dans les deux enroulements. Les courants dérivés à travers ceux-ci sortent par des fils tendus parallèlement et reliés à deux bornes distinctes. Si les résistances des deux branches dérivées sont les mêmes, les

courants partiels sont égaux et les couples électromagnétiques développés se font équilibre, à la condition que les bobines se déplacent dans des régions du champ magnétique de même intensité. Afin de satisfaire à cette condition, les aimants sont munis de pièces polaires mobiles, dont la position peut être réglée par des vis micrométriques. Grâce à cet artifice, l'équilibre peut être obtenu si même, ce qui est le cas général, les deux bobines ne

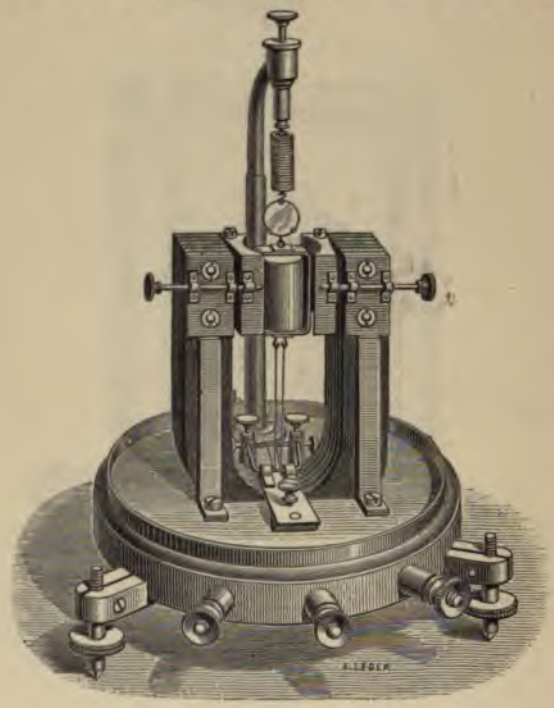


Fig. 71.

sont pas tout à fait identiques. Pour éviter les déplacements latéraux du système mobile occasionnés par une inégalité dans l'attraction exercée par les pièces polaires sur les courants voisins, il convient d'enrouler la plus grande partie des deux bobines à l'aide de deux fils jointifs et de ne laisser qu'un petit nombre de spires écartées, sur lesquelles s'exerce l'action régulatrice des pièces polaires.

Dans la plupart des galvanomètres différentiels, on règle les deux circuits dérivés de manière qu'ils aient mêmes résistances et mêmes effets électromagnétiques.

On étalonne d'abord les résistances par une des méthodes connues. On s'assure de l'égalité des effets électromagnétiques en faisant passer le même courant dans les deux bobines groupées en

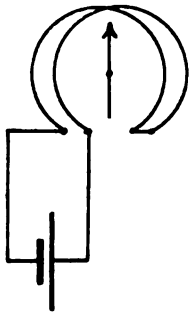


Fig. 72.

série. Si l'on n'obtient pas l'immobilité de l'équipage mobile, on opère la correction par l'un des artifices adoptés dans les appareils ci-dessus.

On peut encore contrôler l'égalité des résistances en dérivant les deux circuits par rapport aux pôles d'une même pile. On corrige

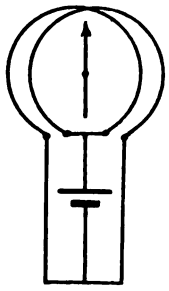


Fig. 73.

la différence éventuellement trouvée en ajoutant une résistance passive à l'un des circuits.

L'appareil ainsi réglé convient pour comparer un courant

inconnu avec un courant connu fourni par une pile étalon dans un circuit de résistance déterminée. L'instrument est surtout en usage pour la mesure des résistances électriques.

On peut comparer des courants inégaux en intercalant un shunt entre les bornes de la bobine galvanométrique correspondant au courant le plus intense. En appelant m le pouvoir multiplicateur du shunt, les deux courants qui amènent l'équilibre du système mobile sont dans le rapport $m : 1$.

A la rigueur, il n'est pas nécessaire que les résistances et les actions électromagnétiques des deux bobines soient égales avec des courants égaux pour que l'appareil puisse être employé par la méthode différentielle.

Soit un galvanomètre pourvu de deux multiplicateurs quelconques, dont les constantes sont respectivement k et k'. Si l'on fait passer dans les bobines des courants d'intensités telles que l'équipage mobile soit en équilibre, on a

$$ki = k'i'$$

d'où

$$\frac{i}{i'} = \frac{k'}{k} = \mathrm{A}.$$

Connaissant la constante A, on peut déterminer le courant i en fonction du courant i' qui l'équilibre. Un des cadres galvanométriques peut être, par exemple, enroulé de fil fin et traversé par le courant connu, produit par une pile étalon, l'autre cadre étant formé de gros fil et parcouru par un courant intense.

Choix d'un galvanomètre. Ampèremètres. — Le choix d'un galvanomètre dépend essentiellement du genre de mesures qu'on veut effectuer. Désire-t-on poursuivre des essais de haute précision sur la mesure absolue des courants, on se servira d'un galvanomètre des tangentes, dont les lectures par réflexion se feront par la méthode subjective. Cet appareil sera placé dans un local construit et meublé avec la préoccupation d'éviter les corps magnétiques. Les conducteurs de connexion composant les circuits seront concentriques ou formés de fils cordés, afin d'éviter les effets électromagnétiques des courants.

Les mesures relatives de précision se font de préférence avec

des galvanomètres à aimant fixe, qui sont moins influencés que les galvanomètres à aimant mobile par les champs parasites. On a employé pendant longtemps pour les mesures exigeant une grande sensibilité les galvanomètres astatiques du genre Kelvin, mais on est parvenu à donner aux galvanomètres du genre Deprez et d'Arsonval une sensibilité à peu près aussi grande.

Pour les mesures balistiques, les galvanomètres à aiguilles lourdes mobiles sont les plus convenables.

S'il s'agit de mesures à effectuer dans le voisinage des dynamos, le galvanomètre Deprez et d'Arsonval peut être employé. Pour les mesures courantes, on préfère les appareils à lecture directe qui sont moins encombrants et qui sont suffisants lorsque l'approximation à atteindre est inférieure au 1/100. Les galvanomètres des tangentes de Lord Kelvin et le galvanomètre de torsion, ont été recommandés pour cet usage, mais ils sont encore trop influencés par les aimants puissants.

Un galvanomètre industriel ou *ampèremètre*, doit être portatif; il doit pouvoir se mettre en station rapidement, soit sur une table, soit contre un mur. Il faut qu'un tel instrument soit à lecture directe, la graduation étant faite en ampères ou en multiples d'ampères ; on cherche à obtenir autant que possible des divisions également écartées pour des différences égales d'intensité.

Les galvanomètres industriels doivent être très peu influencés par les champs magnétique parasites ; cette condition est particulièrement importante pour les appareils à placer sur les tableaux de distribution des usines électriques. Enfin, les systèmes mobiles doivent être soumis à des couples assez énergiques pour prendre rapidement leur position d'équilibre.

Au besoin, un amortissement spécial est utilisé pour accélérer les lectures. Lorsque les courants subissent une variation périodique, comme c'est le cas lorsque les dynamos sont conduites par des moteurs mal réglés, il importe que la période d'oscillation propre de l'ampèremètre ne corresponde pas à celle du courant; sinon les fluctuations s'amplifient au point de rendre les lectures impossibles.

Ampèremètre à cadre mobile. Système Weston. Système Chauvin et Arnoux. — M. Weston a rendu le galvanomètre

Deprez et d'Arsonval portatif en supportant la bobine mobile entre deux pointes pivotant sur des chapes en agathe et en employant deux ressorts spiraux en bronze phosphoreux pour diriger le cadre

Fig. 74.

et donner accès au courant, fig. 74 et 75. La bobine est enroulée sur une carcasse d'aluminium qui assure l'amortissement des

Fig. 75.

oscillations. Un index effilé en aluminium, fixé au cadre, pointe les indications sur un cadran gradué dans le plan duquel se trouve une glace qui permet d'éviter l'erreur de parallaxe. Grâce à l'emploi des pièces polaires étendues, les déviations sont sensiblement proportionnelles aux courants, dans un angle d'environ 70°.

Pour la mesure des courants intenses, l'appareil contient un shunt reliés aux bornes extérieures. L'appareil doit être vérifié de temps en temps par suite de l'affaiblissement progressif, d'ailleurs très faible, de l'aimant directeur.

M. Weston construit sur le même principe des millivoltmètres qui, combinés avec des shunts constitués par des étalons de 0,1, de 0,01 ou de 0,001 d'ohm, permettent de mesurer des courants compris entre des limites très étendues.

MM. Chauvin et Arnoux ont simplifié de la manière suivante la construction de ce galvanomètre. L'aimant de forme circulaire est alésé de manière à éviter les pièces polaires rapportées. C'est une pièce d'acier au tungstène trempé dur, puis recuit légèrement avant

Fig. 76.

Fig. 77.

l'aimantation, de manière à augmenter sa force coërcitive. Les lignes de force de l'aimant sont condensées à l'aide d'une sphère d'acier fabriquée comme les billes pour coussinets. La bobine est une couronne de fil de cuivre sertie entre deux bagues de cuivre découpées dans un tube, lesquelles servent d'amortisseur. Ce système mobile monté entre pointes d'acier pivotant sur des chapes en pierre fine est dirigé par deux ressorts spiraux.

La fig. 78 montre un appareil semblable dérivé sur une résistance faible en vue de mesurer des courants intenses.

Fig. 78.

Ampèremètres à cadre fixe. Systèmes Deprez et Carpentier, Hummel, Dobrowolski, Evershed. Graduation. — Dans la majorité des galvanomètres industriels une pièce de fer doux est sollicitée par un cadre fixe de manière à s'orienter dans la direction des lignes de force magnétique due au courant ou à se déplacer vers la région du champ dont l'intensité est la plus grande. La force antagoniste qui s'oppose à l'action du courant est l'attraction d'un aimant directeur, le poids de la pièce mobile ou l'élasticité d'un ressort.

L'attraction d'un aimant directeur est mise à profit dans le galvanomètre Deprez et Carpentier qui comprend une bobine B, à l'intérieur de laquelle il y a une palette de fer doux pivotant entre deux pointes et orientée par un double aimant recourbé (fig. 79 et 80). Le courant traversant la bobine tend à faire dévier la palette qui, sous l'action des deux couples contraires, prend une position d'équilibre marquée par un index. Si l'axe de la bobine était

normal à la ligne des pôles de l'aimant, le couple dû au courant irait en s'affaiblissant à mesure que l'aiguille dévie. Comme le couple directeur augmente au contraire dans ces conditions, les accroissements de déviation correspondant à des variations de

Fig. 79.

courant égales seraient de plus en plus petits. Afin d'éviter cet inconvénient, la bobine est inclinée sur la ligne des pôles et le courant y est dirigé de manière à ramener l'aiguille parallèlement

Fig. 80.

aux spires du fil. Le couple déviant croît alors en même temps que le couple directeur, et il y a à peu près proportionnalité entre l'angle de déviation et le courant.

Grâce à la puissance de l'aimant directeur, les mouvements de l'aiguille sont rapides et l'influence des aimants et des courants voisins est peu sensible.

Dans l'appareil de M. Hummel, une palette courbe en fer doux E (fig. 81) pivote autour d'un axe et entraîne dans son mouvement un indicateur en cuivre Z, dont l'extrémité se déplace devant une graduation. L'équipage mobile est en équilibre sous l'action de la pesanteur quand l'index pointe le zéro. Un petit

écrou vissé sur Z et faisant office de contrepoids permet de ramener l'index à l'extrémité de la graduation lorsqu'on met l'appareil en place. Quand on envoie dans le conducteur L L le courant à mesurer, la palette est sollicitée à s'approcher de celui-ci en vertu de la tendance qui pousse les corps magnetiques à se déplacer vers les parties du champ où l'intensité est maxima. Il s'ensuit que l'index est dévié d'un angle correspondant à l'équilibre entre le

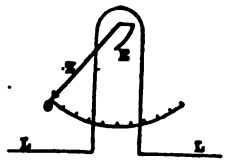


Fig. 81.

couple électromagnétique et le couple de la pesanteur. Lorsque le courant est intense, une seule boucle de fil conducteur suffit, comme le montre la fig. 77, pour produire le champ magnétique nécessaire au déplacement de la palette E. Si le courant est faible, au contraire, on enroule autour de celui-ci un nombre de spires de fil fin suffisant pour réaliser l'intensité de champ voulue.

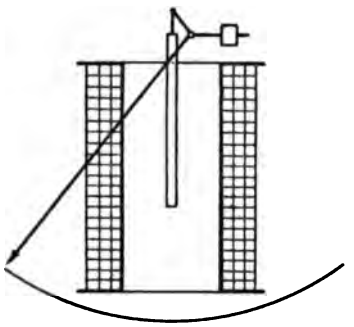


Fig. 82.

Dans le système Dobrowolski, un fil de fer doux, équilibré par un contrepoids, tend à descendre dans une bobine sous l'action du courant qui parcourt celle-ci. Un index fixé à l'axe de rotation mesure la déviation, fig. 82.

Enfin, dans quelques ampèremètres, les forces électromagné-

tiques qui sollicitent la pièce de fer doux mobile sont modifiées par la présence de pièces de fer fixes, aimantées par le courant, et réagissant sur la pièce mobile. Si les pièces de fer doux fixes s'aimantent dans le même sens que cette dernière, elles l'attirent. C'est ainsi que, dans l'ampèremètre Evershed (fig. 83), deux pièces de fer doux *p p'* disposées à l'intérieur de la bobine magnétisante, sont aimantées par le courant et agissent sur une

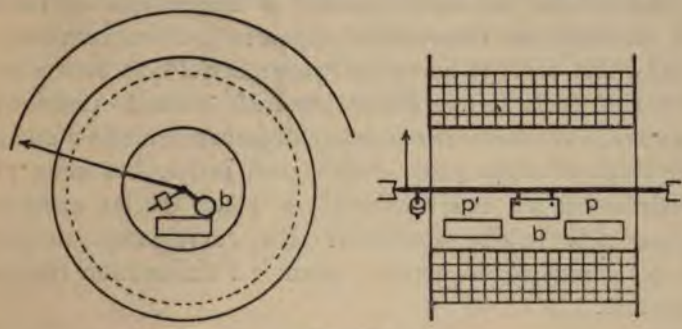


Fig. 83.

barette de même métal *b* fixée latéralement à l'axe de l'aiguille indicatrice. En déplaçant *p* et *p'*, on peut modifier le déplacement de *b* correspondant à une même variation de courant dans la bobine. D'autres appareils comportent des pièces fixes disposées à l'extérieur de la bobine pour renforcer l'action électromagnétique du courant sur l'équipage mobile.

Dans les appareils à pièces de fer doux mobiles et sans aimants permanents, le couple déviant est sensiblement proportionnel au carré de l'intensité du courant, si l'aimantation du fer est faible, attendu que celle-ci croît alors à peu près comme l'intensité du courant. Mais pour diminuer les effets d'hystérésis qui donnent lieu à des aimantations différentes pour un même flux électrique, on doit employer des dispositions propres à aimanter le fer doux au delà du coude de la courbe du magnétisme, vers la saturation, avec les courants les plus faibles que l'on désire mesurer. Le couple déviant est alors presque proportionnel à l'intensité du courant. On arrive à ce résultat en multipliant les ampères-tours de la bobine magnétisante et en utilisant des masses de fer doux

très faibles, de forme allongée, suivant la direction des lignes de force. Néanmoins, on n'arrive jamais à éviter complètement les effets d'hystérésis qui sont surtout sensibles dans les systèmes à pièces de fer auxiliaires. Il faut avoir soin de ne jamais fermer complètement le circuit magnétique dans le fer, il en résulterait des effets d'hystérésis très marqués. Il est encore à conseiller de faire passer le courant toujours dans le même sens à travers l'appareil, afin d'éviter les renversements de magnétisme du fer doux et les aimantations rémanentes opposées qui en résultent. On marque d'une croix la borne de l'appareil qui doit être reliée au pôle positif de la source d'électricité. M. Abdank-Abakanowitz, entr'autres, a conseillé de composer l'équipage mobile d'une pièce de fer doux et d'une pièce d'acier plus petite. Les deux pièces sont aimantées en sens inverse, la pièce d'acier étant sollicitée par une bobine auxiliaire. En combinant convenablement ces éléments, on arrive à annuler l'aimantation rémanente du système.

Les appareils à fer doux dépourvus d'aimants peuvent servir pour les courants alternatifs, à la condition d'être gradués pour la fréquence particulière des courants qu'ils sont appelés à mesurer.

Afin d'utiliser le même instrument pour les courants continus et les courants alternatifs, M. Evershed se sert d'un shunt inductif qui absorbe à peu près 6 pour 100 du courant continu à mesurer et seulement 2 pour 100 du courant alternatif. Les quelques pour 100 que la bobine magnétisante absorbe en plus avec les courants alternatifs donnent au fer doux mobile son aimantation normale en neutralisant l'influence des courants de Foucault qui se développent dans les pièces métalliques, telles que la boîte de l'appareil, courants qui tendent à réduire l'action de la bobine sur la pièce mobile.

Un ampèremètre est généralement gradué à l'aide d'un galvanomètre étalon. On fait passer des courants croissants dans les deux appareils et l'on note les déviations de l'ampèremètre correspondant à des multiples ou à des sous-multiples de l'ampère. Pour constater nettement les effets de l'hystérésis, on relève les déviations déterminées par des courants croissants et par des courants décroissants obtenus à l'aide d'un rhéostat à réglage continu ne

provoquant pas d'interruptions du courant. Le fer doux suit ainsi les variations cycliques de la courbe du magnétisme.

Les frottements du système mobile s'estiment en vérifiant de combien on peut modifier le courant en plus ou en moins sans altérer visiblement l'indication de l'instrument.

En général, les appareils à pièces de fer doux mobiles et sans aimants directeurs, sont très influencés par les aimants et les courants voisins. Il ne justifient pas le succès qu'ils ont obtenu comme appareils de mesure pour les tableaux de distribution. On a conseillé l'emploi de systèmes astatiques formés par la combinaison de deux équipages. Mais cette complication enlève aux ampèremètres leur principale qualité, qui est le bon marché.

Les ampèremètres à fer doux disposés sur les tableaux de distribution ne doivent être considérés que comme des indicateurs de courant dont ils ne permettent pas de mesurer exactement l'intensité.

Chapitre IX.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES ACTIONS ÉLECTRODYNAMIQUES.

Principe. — Si l'on remplace l'aiguille aimantée d'un galvanomètre à cadre fixe par une bobine mobile dans laquelle le courant arrive par l'intermédiaire d'une suspension bifilaire métallique, la bobine mobile tend à se placer parallèlement à la borne fixe quand les deux parties du système sont parcourues par des courants. Un instrument basé sur ce principe porte le nom d'*électrodynamomètre*.

L'action électrodynamique équilibrée par la torsion de la suspension est proportionnelle au produit des intensités des courants qui traversent les deux bobines et, si le même courant parcourt celles-ci, au carré de l'intensité ; d'où la possibilité de se servir de ces instruments pour la mesure des courants alternatifs.

On peut aussi mesurer le couple électrodynamique en suspendant, au-dessus d'une bobine disposée à plat, une seconde bobine parcourue par le même courant, et en équilibrant, à l'aide d'une balance, l'attraction mutuelle des bobines. Les appareils de ce genre sont appelés *balances électrodynamiques*.

Electrodynamomètre de Weber. — La bobine mobile est portée par un système bifilaire et disposée normalement à la bobine fixe. Une tête de torsion permet de ramener la bobine mobile dans sa position de repos. Un miroir sert à la lecture des déviations. L'appareil est mis en station de manière que l'axe du cadre mobile soit orienté dans le méridien magnétique.

Fig. 84.

Pour une déviation θ, le couple électrodynamique peut être représenté par $A\, i^2 \cos\theta$, A étant une fonction des dimensions et

des distances relatives des bobines, qui s'annule lorsque celles-ci sont parallèles et possèdent le même centre de figure.

Le couple antagoniste développé par la torsion du bifilaire est $c \sin\theta$.

D'autre part, le couple $d\Omega$ au champ magnétique terrestre est $\pm B i \mathcal{H} \sin\theta$ suivant le sens du courant.

On a l'équation d'équilibre

$$A i^2 \cos\theta = \sin\theta \pm B \mathcal{H} i \sin\theta.$$

Si l'on ramène la bobine mobile parallèlement au méridien en agissant sur la tête de torsion, le troisième couple s'annule et l'on a simplement, pour une torsion θ,

$$i = \sqrt{\frac{c \sin\theta}{A}}.$$

Lorsque l'angle θ est suffisamment faible, on peut écrire

$$i = \sqrt{\frac{c\theta}{A}}.$$

Si la bobine mobile était suspendue comme dans le galvanomètre Deprez et d'Arsonval, l'appareil serait plus sensible et cette dernière relation serait rigoureusement applicable.

Électrodynamomètre Siemens. — L'appareil précédent ne convient guère que pour la mesure des courants faibles, à cause du double rôle de la suspension. Pour mesurer les courants intenses, Siemens a donné à l'électrodynamomètre la forme représentée dans la fig. 85. La bobine mobile, placée à l'extérieur de la bobine fixe, est réduite à une seule spire suspendue par un fil de cocon et orientée par un ressort à boudin fixé à une tête de torsion. Le courant pénètre dans la spire par des godets à mercure superposés suivant l'axe de rotation. Un fil à plomb sert à disposer l'appareil de niveau. La tête de torsion permet de ramener le cadre mobile dans la position indiquée par un index porté par celui-ci.

L'action de la terre est nulle si le plan du cadre mobile est normal au méridien. Elle est, en tous cas, très faible, puisqu'il n'y a qu'une seule spire traversée par le courant.

La formule d'emploi de l'instrument est

$$i = \frac{1}{K}\sqrt{\theta}.$$

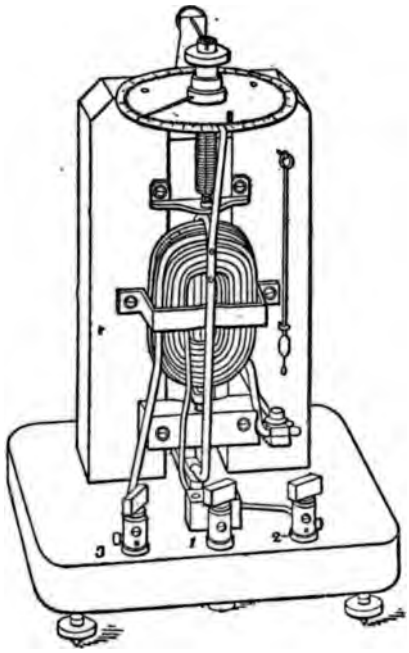


Fig. 85.

Si l'on mesure des courants alternatifs, la relation devient

$$i_{eff.} = \frac{1}{K}\sqrt{\theta.}$$

Électrodynamomètre de M. Fleming. — Un disque de cuivre D est suspendu au centre d'une bobine *c* et est orienté à 45° par rapport à cette bobine. Lorsqu'on fait passer dans celle-ci des courants ondulatoires, leur réaction sur les courants induits dans le disque tend à amener ce dernier dans la position *bb'*, pour laquelle le flux périodique qui traverse la plaque est minimum. Le miroir M permet de lire, par réflexion, l'angle d'équilibre de la pièce mobile, soumise d'une part aux forces électrodynamiques, qui sont sensi-

blement proportionnelles au carré des courants à mesurer et, d'autre part, à la réaction de torsion du fil de suspension. En substituant au disque de cuivre un bout de fil de fer, M. Fleming

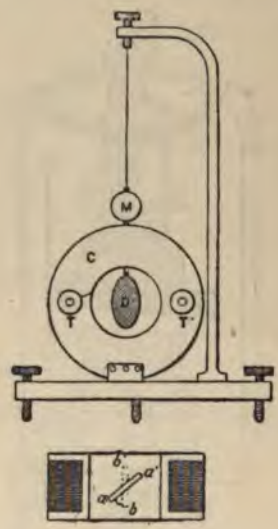


Fig. 86.

est arrivé à déceler au moyen de cet appareil des courants téléphoniques alternatifs de l'ordre du micro-ampère.

Balance électrodynamique de Lord Kelvin. — On doit à Lord Kelvin une série d'appareils appelés ampèremètres-balances, dans lesquels un fléau porte à chacune de ses extrémités une bobine mobile disposée entre deux bobines fixes. Les six bobines sont parcourues par le même courant, de telle manière que l'une des bobines mobiles est attirée vers le bas et l'autre vers le haut. Les effets du magnétisme terrestre sont compensés par le fait que les bobines mobiles sont parcourues dans le même sens par le courant. Pour amener celui-ci aux bobines mobiles, Lord Kelvin a eu l'idée ingénieuse de suspendre le fléau par des faisceaux très flexibles composés d'un grand nombre de fils fins en cuivre. Des poids mobiles sur les bras du fléau permettent de ramener celui-ci dans la position horizontale et d'estimer l'intensité du courant

traversant l'appareil. Ces poids sont déplacés par l'intermédiaire d'un petit chariot qu'on fait mouvoir à l'aide de deux cordelettes de soie. Les index qui terminent le fléau servent à marquer la position horizontale de celui-ci.

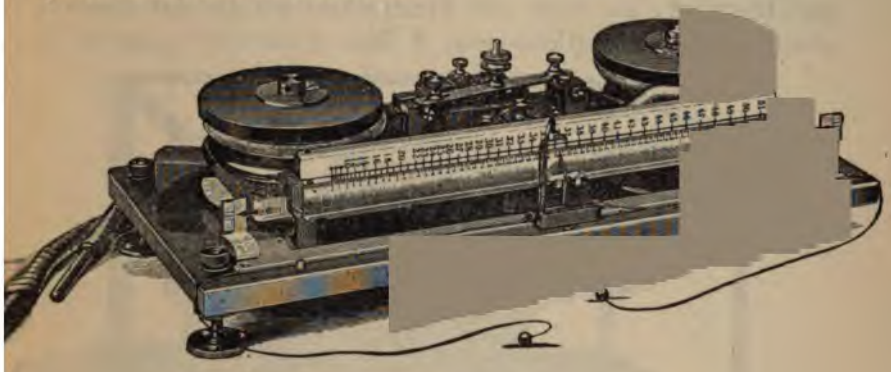


Fig. 87.

Comme une bobine parcourue par des courants alternatifs est repoussée par toute pièce métallique voisine, les appareils servant à la mesure des courants de ce genre sont montés sur un socle d'ardoise et les bobines sont elles-mêmes enroulées sur des noyaux d'ardoise ou de porcelaine.

La formule de l'appareil est comme ci-dessus

$$i = \frac{1}{K}\sqrt{p}$$

ou

$$i_{eff.} = \frac{1}{K}\sqrt{p},$$

p représentant le moment du couple dû à la pesanteur.

Les balances de Lord Kelvin présentent une graduation empirique. Il existe une série d'appareils permettant de mesurer de 1000 ampères à 0,001 d'ampère, l'échelle de chaque instrument étant graduée de 1 à 100.

Balance absolue de M. Pellat. — M. Pellat a imaginé une balance électrodynamique dans laquelle une longue bobine fixe, disposée horizontalement et produisant un champ sensiblement

uniforme dans sa région médiane, agit sur une petite bobine suspendue verticalement dans cette région à l'extrémité d'un fléau de balance. Des poids attachés à l'autre extrémité du fléau équilibrent le couple électrodynamique que l'on peut déterminer par le calcul, en sorte que l'instrument permet des mesures absolues. Des corrections sont à faire pour tenir compte de

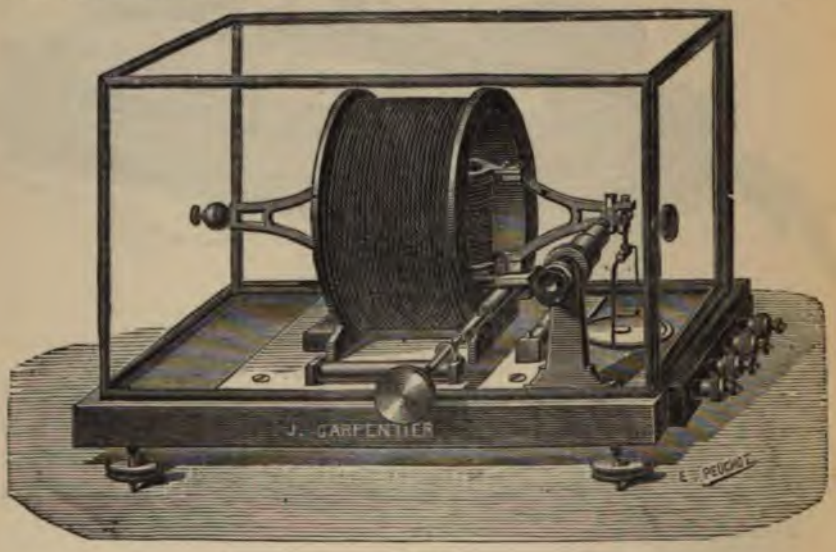


Fig. 88.

l'influence des extrémités de la bobine fixe et de l'action du magnétisme terrestre sur la bobine mobile. Un autre appareil plus portatif construit sur le même principe (fig. 88) et pourvu d'une bobine fixe de faible longueur, a reçu le nom d'ampère-étalon. Cet appareil, étalonné à l'aide du précédent, permet d'évaluer les courants en appliquant la formule

$$i = \frac{1}{K}\sqrt{p}.$$

Chapitre X.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES EFFETS CALORIFIQUES.

Ampèremètres à dilatation. Système Holden. Système Hartmann et Braun. — La loi de Joule montre qu'on peut déduire l'intensité du courant qui traverse un conducteur de la quantité de chaleur développée dans celui-ci. Ce procédé est applicable à la mesure des courants alternatifs, puisque l'effet est indépendant du sens du courant.

En enfermant le conducteur considéré dans un calorimètre, on peut mesurer la quantité de chaleur développée en un temps donné, et en conclure l'intensité efficace du courant. Cette méthode est rarement employée parce qu'elle entraîne des manipulations complexes et qu'elle offre peu de sensibilité.

Mais on utilise, particulièrement pour la mesure des courants alternatifs, les effets de dilatation simple ou de dilatation différentielle, produits par la chaleur dans les conducteurs homogènes ou hétérogènes traversés par des courants.

Voici un dispositif dû à M. Holden. Le courant traverse une bande métallique h découpée à l'emporte-pièce en forme de fer à cheval. Une bande semblable h', mais plus mince, est fixée au

même support que la première. Les deux lames sont rivées ensemble vers le coude. La lame *h'* oblige la lame *h* à s'infléchir vers le bas lorsque celle-ci est dilatée par le courant. L'inflexion est amplifiée par un système de leviers et lue sur une échelle.

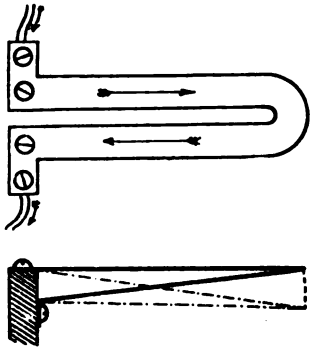


Fig. 89.

Les deux lames étant en même métal, les variations extérieures de la température ne causent aucune déviation, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on utilise, comme dans le thermomètre métallique de Bréguet, la dilatation différentielle d'une hélice formée de deux métaux hétérogènes traversés par le courant.

Le métal servant de conducteur doit pouvoir résister à de hautes températures sans s'oxyder. Les alliages de platine-argent et de platine-iridium présentent cette qualité.

L'appareil Hartmann et Braun comprend un shunt traversé par le courant à mesurer et sur lequel est dérivé un fil mince en alliage platine-argent *f*, auquel est fixé un fil de laiton *l*. Au milieu de ce dernier vient s'attacher un fil de soie *s*, passant autour d'une petite poulie et tendu par un ressort *r*. Lorsqu'il est échauffé par le courant dérivé, le fil *f* s'allonge et s'infléchit ainsi que *l*, sous la tension du ressort *r*, tandis qu'un index porté par l'axe de la poulie enregistre une déviation.

L'appareil est gradué empiriquement de même que le précédent. La plaque rigide qui supporte le fil *f* doit être constituée par la juxtaposition de pièces de laiton et de fer dont l'ensemble présente le même coefficient de dilatation que le platine-argent. De la sorte

les variations de la température ambiante n'exercent pas d'influence perturbatrice.

Le système mobile est pourvu d'un disque en aluminium qui se déplace entre les pôles d'un aimant recourbé et assure l'amortissement des oscillations.

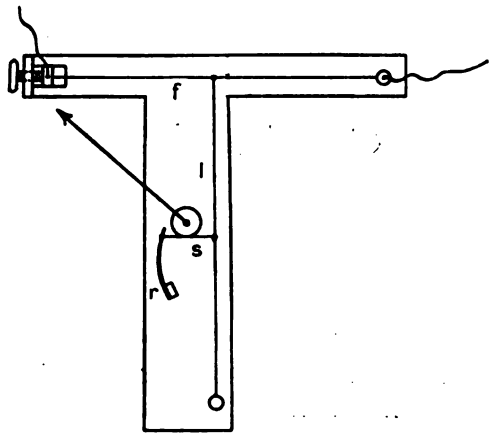


Fig. 90.

Les ampèremètres à dilatation sont entièrement à l'abri des influences électromagnétiques extérieures. Ils conviennent donc tout spécialement pour les tableaux de distribution.

Chapitre XI.

MESURE DES POTENTIELS BASÉE SUR LES MÉTHODES ÉLECTROSTATIQUES.

Mesure indirecte par l'électromètre absolu de Lord Kelvin. — Lord Kelvin a imaginé une méthode pour la détermination des potentiels sans l'emploi d'étalons de comparaison. La fig. 91 montre le principe de l'appareil utilisé. Un condensateur est formé par une armature fixe B et une armature A, dans laquelle on a

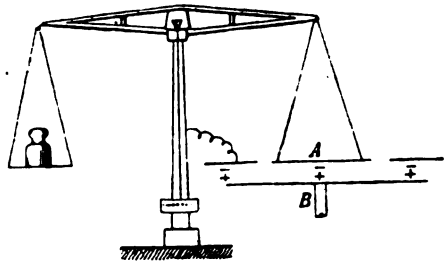


Fig. 91.

séparé, par une rainure étroite, un disque fixé à l'un des plateaux d'une balance. Le disque est relié au corps dont on cherche le potentiel, tandis que l'armature inférieure est mise en communi-

cation avec le sol. Il faut tenir compte de ce fait que la liaison indiquée abaisse le potentiel du corps, si ce dernier n'est pas en communication avec une source d'électricité. En effet la charge du corps se partage alors entre celui-ci et le disque proportionnellement aux capacités correspondantes. Il faut connaître ces capacités pour calculer la réduction du potentiel après la réunion. Les fils de liaison doivent être de capacité négligeable pour éviter une nouvelle correction. On emploiera par exemple des conducteurs minces supportés par des fils de soie tenus à distance des corps conducteurs voisins.

En appelant V le potentiel électrique du disque en unités électromagnétiques, s la surface de ce dernier en cm^2 et r l'écartement des armatures en cm, la force attractive exercée sur l'équipage mobile est, en dynes,

$$p = \frac{V^2 s}{8 \pi k r^2}$$

où k représente $3^2 \times 10^{20}$.

On déduit de là

$$V = \sqrt{\frac{8 \pi k p r^2}{s}}.$$

Lord Kelvin a réalisé des balances très sensibles pour mesurer les attractions électrostatiques toujours très faibles.

Toutefois, ces appareils ne conviennent que pour l'évaluation des potentiels très élevés. Leur maniement est d'ailleurs délicat, ce qui a beaucoup restreint leur application.

Les électromètres en usage courant sont employés pour des méthodes de mesure relatives.

Principe de l'électromètre à quadrants utilisé à la mesure directe des potentiels. — Un cylindre de cuivre cc est divisé en quatre parties A, B, C, D, fig. 92. Les quadrants opposés sont reliés entr'eux à l'aide de fils conducteurs. Un autre fil mince supporte librement deux palettes cylindriques réunies à la partie supérieure et à la partie inférieure par des entretoises métalliques. Les déviations du cadre E ainsi formé sont observées par réflexion. Dans sa position normale, le plan de symétrie du cadre passe par une des lignes de séparation des quadrants.

Supposons qu'on relie le cadre au sol par l'intermédiaire du fil de suspension et qu'on porte les deux paires de quadrants à des potentiels égaux et contraires. Le cadre s'électrise par influence ; il est sollicité également dans les deux sens et reste immobile.

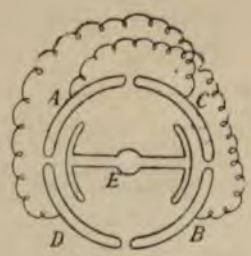


Fig. 92.

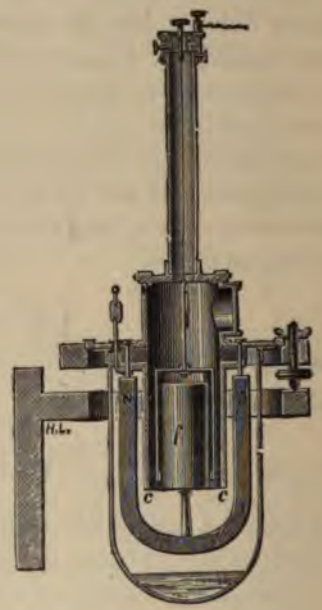


Fig. 93.

Si le cadre reçoit une charge positive, il se déplace aussitôt vers les quadrants négatifs. Si sa charge est négative, la déviation est dirigée du côté des quadrants positifs.

Le cadre constitue un condensateur avec chacune des paires de quadrants. Appelons V le potentiel du cadre, V_1 celui des quadrants A et B, V_2 celui des quadrants C et D.

La charge du condensateur E — A, B est proportionnelle à la différence des potentiels $V - V_1$; la composante horizontale de la force qui tend à déplacer le cadre vers les quadrants considérés peut être représentée par $a\,(V - V_1)^2$, a étant un coefficient constant. Le cadre est sollicité dans la direction opposée par

une force égale à $a\,(V - V_2)^2$, la constante a étant la même, eu égard au faible déplacement du cadre et à l'identité de forme des quadrants. La résultante des deux actions est

$$a\,(V_2 - V_1)\,(2\,V - V_1 - V_2).$$

Son moment est équilibré par le couple de torsion du fil. On peut donc écrire

$$\theta = k\,(V_2 - V_1)\left(V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right).$$

M. Gouy a montré que la formule précédente est en défaut lorsque les potentiels des quadrants sont considérables relativement à celui de l'aiguille. Il existe alors un couple directeur électrique qui agit en même temps que le couple de torsion et dont l'action doit entrer en ligne de compte.

Il faut remarquer en outre que, si l'aiguille n'est pas de même métal que les quadrants, il naît une différence de potentiel de contact qui altère les résultats et qu'on élimine en faisant deux expériences successives dans lesquelles la différence de potentiel parasite produit des effets égaux et contraires. La moyenne des déviations obtenues constitue le résultat cherché.

Dans l'emploi de l'électromètre à quadrants, divers cas sont à considérer qui permettent de simplifier la formule générale ci-dessus.

1° Dans l'hypothèse faite au début où les quadrants sont maintenus à des potentiels égaux et opposés, $V_1 = -V_2$, ce qu'on peut obtenir en les reliant aux deux pôles d'une pile bien isolée, d'un nombre pair d'éléments, le milieu de la série des éléments étant uni au sol, on a

$$\theta = 2\,k\,VV_2. \qquad (1)$$

La déviation est proportionnelle au potentiel du cadre.

2° Lorsque le potentiel de l'aiguille est très grand relativement à ceux des quadrants, la formule se réduit à

$$\theta = k\,(V_2 - V_1)\,V. \qquad (2)$$

3° Si l'on fait communiquer le cadre avec l'une des paires de quadrants, C, D par exemple, on a

$$V = V_2$$

d'où

$$\theta = k\,(V - V_1)\left(V - \frac{V + V_1}{2}\right) = \frac{k}{2}\,(V - V_1)^2. \qquad (3)$$

La déviation est alors proportionnelle au carré de la différence de potentiel du cadre et de A, B.

Les formules (1) et (2) peuvent être employées pour déterminer une différence de potentiel constante. Pour faire usage de la formule (1), le cadre est d'abord mis en communication avec l'un des pôles d'une pile étalon dont l'autre pôle est relié au sol. La déviation obtenue θ est proportionnelle à la force électromotrice e de la pile étalon

$$\theta = Ae.$$

On répète l'expérience en mettant les deux points dont on cherche la différence de potentiel en relation l'un avec la terre et l'autre avec le cadre mobile. La nouvelle déviation θ' est liée à la différence de potentiel V cherchée par la formule

$$\theta' = A\,V;$$

d'où

$$V = \frac{\theta'}{\theta}\,e.$$

Pour électriser les quadrants, on se sert de petits éléments de pile à un liquide, constitués au moyen d'éprouvettes ou de godets maintenus dans un lit de paraffine. On peut employer encore de petits couples secondaires formés de fils en plomb plongeant dans une solution sulfurique au dixième. On réalise ainsi sous un petit volume des piles produisant de hauts potentiels.

Au lieu de procéder comme il vient d'être dit, on peut charger le cadre mobile à un potentiel élevé, par exemple en le mettant en communication métallique avec une pile auxiliaire d'un grand nombre d'éléments, le pôle libre de cette pile étant relié au sol. Lord Kelvin a employé avec ses électromètres à quadrants une

petite machine électrostatique appelée replenisher (1), capable d'électriser l'aiguille à un potentiel très élevé.

On connecte successivement les deux pôles de la pile étalon et les deux points dont on cherche la différence de potentiel aux paires de quadrants et l'on applique la formule (2).

Par suite de la faible intensité des forces électrostatiques, l'électromètre est un appareil peu sensible. Il n'est plus guère employé que pour la mesure des différences de potentiel élevées, avec lesquelles les méthodes électromagnétiques présentent des inconvénients. Pour la mesure des forces électromotrices minimes, ces dernières méthodes sont au contraire plus exactes et plus commodes.

Pour l'évaluation des grandes différences de potentiel, on fait usage de la formule (3). On relie le cadre à l'une des paires de quadrants et l'on compare la différence de potentiel cherchée V à une différence de potentiel connue.

On a

$$\theta = B V^2,$$

$$\theta' = B e^2;$$

d'où

$$V = e \sqrt{\frac{\theta}{\theta'}}.$$

Lorsque la différence de potentiel à mesurer varie périodiquement de sens, comme c'est le cas entre les extrémités d'un conducteur parcouru par des courants alternatifs, la déviation est proportionnelle au carré moyen de V, et, par suite,

$$V_{eff} = e \sqrt{\frac{\theta}{\theta'}}.$$

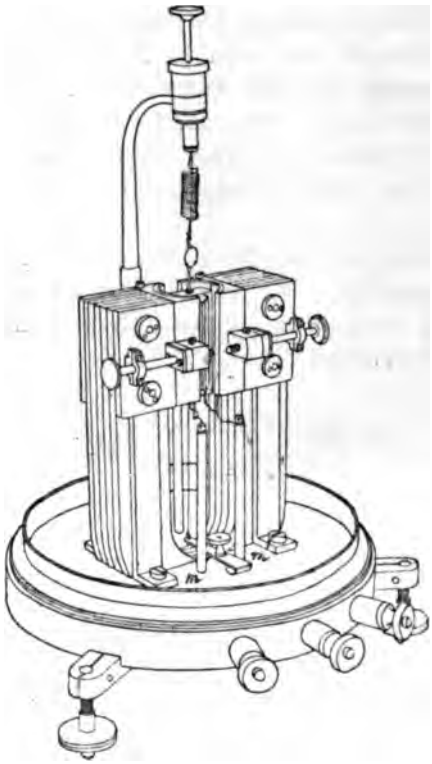
Modèles d'électromètres à quadrants de Lord Kelvin, de M. Edelmann, de M. Mascart et de l'auteur. Voltmètres électrostatiques de Lord Kelvin, de MM. Ayrton et Mather et de

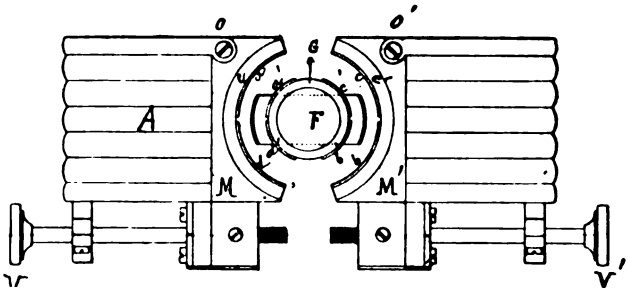
---

(1) Voir Eric Gerard. *Leçons sur l'Électricité.*

M. Rowland. — La fig. 92 représente l'électromètre à quadrants de M. Edelmann, modifié par l'auteur afin de rendre le mouvement du cadre apériodique.

Dans ce but, les quadrants sont embrassés par un aimant en fer





à cheval N S, dont les lignes de force sont concentrées par une pièce en fer doux *f*. Le cadre se termine à la partie inférieure par une entretoise en forme d'anneau qui joue librement autour de *f*. Les courants induits développés dans le cadre pendant le mouvement de celui-ci amortissent complètement ses oscillations. Au fond de l'enveloppe en verre qui entoure l'électromètre, on verse de l'acide sulfurique concentré destiné à dessécher l'atmosphère de l'appareil. Les lectures se font par réflexion.

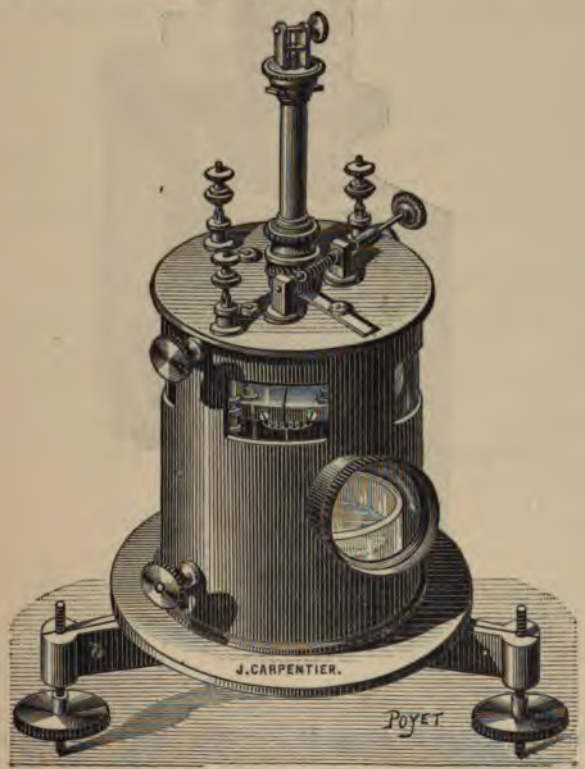


Fig. 95.

L'électromètre de M. Edelmann présente l'inconvénient de ne pas permettre le déplacement des quadrants pour corriger éventuellement un léger défaut de symétrie du cadre, défaut qui amène une déviation lorsque celui-ci est électrisé et que les quadrants sont à l'état neutre. L'auteur a obvié à cet inconvénient en utilisant

la disposition décrite à propos de son galvanomètre différentiel. Il lui a suffit de remplacer la bobine de ce dernier par un cadre en aluminium, analogue à celui de l'électromètre précédent, et de fixer les quadrants aux pièces polaires mobiles, recouvertes au préalable d'une chemise isolante, fig. 94. Le noyau en fer qui a pour but de

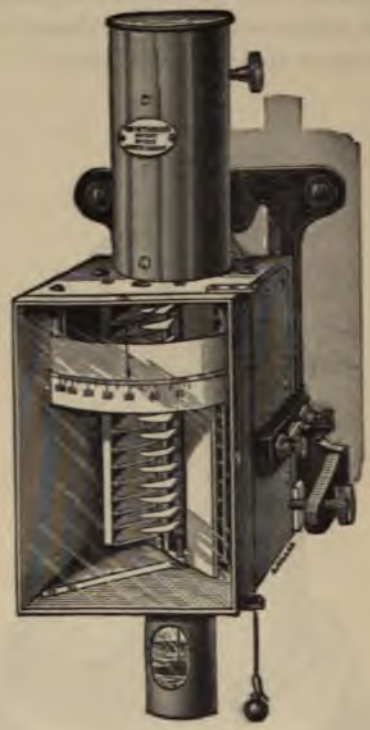


Fig. 96.

concentrer les lignes de force de l'aimant dans l'espace où se meut le cadre, en vue d'amortir les oscillations de ce dernier, est également revêtu d'une enveloppe isolante et porte quatre quadrants disposés en regard des quadrants extérieurs et reliés à ceux-ci deux à deux, de manière à renforcer leur action.

Les appareils décrits plus haut ne conviennent que pour la mesure de la force électromotrice des piles ou des dynamos capables de restituer constamment l'électricité qui se perd par les

supports des pièces métalliques. Pour mesurer les potentiels des charges statiques, il est nécessaire d'employer des précautions toutes spéciales pour assurer l'isolement de ces pièces. Il faut les fixer à des colonnettes de verre bien propres, placées dans une atmosphère desséchée par l'acide sulfurique.

La fig. 95 montre le modèle d'électromètre de Lord Kelvin, modifié par M. Mascart. Les précautions signalées sont observées. Les quadrants sont découpés dans une boîte de laiton cylindrique et aplatie. La palette mobile, profilée en forme de 8 dont les lobes sont évidés, est suspendue à l'intérieur de cette boîte. Elle est supportée par un bifilaire en soie et se prolonge sous les quadrants par un fil de platine auquel sont attachés le miroir destiné aux lectures et un croisillon plongeant dans une coupe pleine d'acide sulfurique. Outre son action desséchante, celui-ci amortit les mouvements de la pièce mobile et permet de la mettre en communication électrique avec l'extérieur.

Pour mesurer les différences de potentiel très élevées fournies par les dynamos et particulièrement par les alternateurs, on adopte des électromètres à lecture directe, gradués en volts, qu'on désigne parfois sous le nom de voltmètres électrostatiques.

Dans ces appareils, qui sont toujours basés sur l'emploi de la formule (3), on supprime l'une des paires de quadrants.

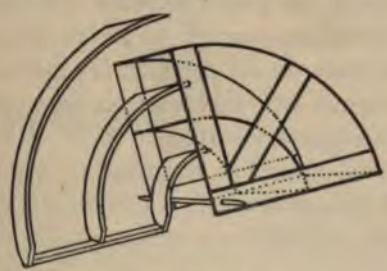


Fig. 97.

Lord Kelvin a combiné, pour la mesure des potentiels de 40 à 800 volts, un instrument appelé voltmètre multicellulaire et formé d'une série de quadrants superposés qui agissent sur des palettes mobiles supportées par un fil métallique mince, fig. 96. Un index en aluminium, se déplaçant devant une graduation, sert aux lectures.

Le voltmètre Ayrton et Mather, fig. 97, comporte deux quadrants cylindriques mobiles entre pointes et attirés entre trois quadrants fixes. Les déviations sont marquées sur une graduation. La force antagoniste est fournie par un contrepoids. L'appareil est supporté par des piliers en ébonite dans une boîte métallique à fixer contre un mur. Les bornes d'attache sont recouvertes de manchons en ébonite pour prévenir les accidents. La liaison entre ces bornes et les quadrants est établie par l'intermédiaire de fils de platine de 0,02 mm de diamètre. Leur fusion évite qu'un courant anormal provoqué par un court-circuit n'endommage l'appareil. Pour préserver celui-ci contre les tensions excessives, un intervalle d'air restreint sépare les connexions extérieures, de manière à favoriser éventuellement la production d'une étincelle et la fusion des coupe-circuits de sûreté.

Des précautions de ce genre doivent toujours être prises avec les voltmètres de haut voltage.

MM. Ayrton et Mather ont remarqué qu'un frottement contre le couvercle des voltmètres amène parfois une électrisation du verre capable de fausser les indications. En vue de se mettre à l'abri de cette cause d'erreur, ils recouvrent le verre d'un vernis transparent légèrement conducteur.

Pour graduer les voltmètres électrostatiques, on peut se servir de piles comprenant un grand nombre d'éléments ou de petits accumulateurs constitués comme on l'a vu ci-dessus. On évalue la force électromotrice de ces piles en les mettant en circuit avec une résistance connue très élevée et en mesurant le courant au moyen d'un galvanomètre sensible.

On peut amplifier la tension fournie par la pile en chargeant à l'aide de celle-ci des condensateurs très bien isolés, qu'on groupe ensuite en cascade, de manière à cumuler les différences de potentiel des armatures.

L'emploi des voltmètres électrostatiques exige une correction pour la force électromotrice de contact. Celle-ci est de 0,5 volt si l'équipage mobile est en aluminium et les quadrants en cuivre. La correction est positive ou négative suivant que les quadrants sont électrisés positivement ou négativement.

M. Rowland est arrivé à soumettre les voltmètres électrostatiques à de hautes tensions, sans courir le risque de provoquer des étin-

celles entre les pièces électrisées en immergeant l'appareil dans l'huile. Celle-ci a, en outre, pour effet d'accroître la capacité et par suite les charges agissantes.

Fig. 98.

Electromètre capillaire de M. Lippmann. — Un tube vertical T terminé par une pointe capillaire et contenant du mercure plonge dans une éprouvette remplie d'eau acidulée de $^1/_6$ d'acide sulfurique. Une couche de mercure déposée au fond de l'éprouvette

étant mise en communication avec le pôle positif d'un élément de pile Daniell par une électrode en platine P, tandis que le mercure du tube est relié au pôle négatif par une seconde électrode S, on constate aussitôt un relèvement du niveau du mercure dans la pointe capillaire. Cette dénivellation cesse dès que les deux électrodes sont réunies directement entr'elles. Ce phénomène électrocapillaire, découvert par M. Lippmann, est attribué par lui à la déformation des molécules d'eau acidulée qui précède la décomposition du liquide et à laquelle on a donné le nom de polarisation.

Dans les limites de tension qui précèdent la décomposition, ce phénomène, observé à l'aide du microscope, est susceptible d'accuser des différences de potentiel de 1/10000 volt et, par suite, de servir de base à un électromètre particulièrement utile dans les méthodes de réduction à zéro. Lorsqu'on applique l'appareil à la mesure de forces électromotrices plus grandes, mais nécessairement inférieures à 1 volt, on équilibre la tension due à la polarisation par une pression exercée sur la colonne de mercure au moyen d'une poire en caoutchouc et estimée à l'aide d'un manomètre à mercure T'. Il faut avoir soin de mettre l'électrode S à un potentiel inférieur, à celui de l'électrode P, sinon le ménisque capillaire serait polarisé par l'oxygène et la surface du mercure serait altérée.

Chapitre XII.

MESURE DES POTENTIELS PAR LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Méthodes indirectes. — Lorsqu'il s'agit de mesurer la force électromotrice des générateurs électriques et de déterminer la différence entre les potentiels de deux points d'un conducteur parcouru par un courant, on peut recourir à des méthodes basées sur l'emploi des galvanomètres.

Considérons le dernier cas et supposons que le courant soit continu et d'intensité constante.

A défaut d'étalon de force électromotrice, il est possible d'employer des méthodes de mesures absolues.

1. On détermine séparément l'intensité du courant au moyen d'un galvanomètre et la résistance comprise entre les points dont on cherche la différence de potentiel. Le produit des deux valeurs numériques représente la grandeur cherchée.

2. On charge les armatures d'un condensateur étalon en les réunissant aux deux points considérés, et l'on décharge ensuite le condensateur dans un galvanomètre balistique, dont on a déterminé la durée d'oscillation sans amortissement T_0 et la constante permanente k. On a, en appelant c la capacité du condensateur,

V la différence de potentiel cherchée et α_1 l'élongation première du galvanomètre,

$$q = cV = \frac{T_0}{\pi}\frac{1}{k}\,\alpha_1\, e^{\frac{\lambda}{\pi}\,\text{arc tang}\,\frac{\pi}{\lambda}},$$

d'où l'on déduit la valeur de V.

En prenant la différentielle logarithmique de l'expression de cette valeur et en négligeant la correction pour l'amortissement, il vient

$$\frac{dV}{V} = \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} - \frac{dk}{k} - \frac{dc}{c}.$$

Si toutes les erreurs s'ajoutent, l'erreur relative limite du résultat est

$$\frac{dV}{V} = \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} + \frac{dk}{k} + \frac{dc}{c}.$$

On voit qu'il est difficile d'estimer V avec exactitude par cette méthode.

Méthodes directes. Méthode par comparaisons successives. — Le plus souvent, on détermine les différences de potentiel par comparaison avec la force électromotrice d'une pile étalon ; ce procédé permet une exactitude plus grande que la méthode précédente.

Au lieu de calculer la constante balistique du galvanomètre, on élimine celle-ci en chargeant, dans une seconde expérience, le condensateur à l'aide de la pile étalon de force électromotrice *e*.

On obtient ainsi les relations

$$q = cV = \frac{\alpha_1}{K},$$

$$q' = ce = \frac{\alpha'_1}{K};$$

d'où

$$V = e\,\frac{\alpha_1}{\alpha'_1}.$$

Les connexions sont établies par l'intermédiaire d'une clef de décharge C, comme l'indique la fig. 99. On se sert de la cl

d'inversion pour obtenir des élongations de part et d'autre du milieu de l'échelle et éliminer l'influence du déplacement du zéro.

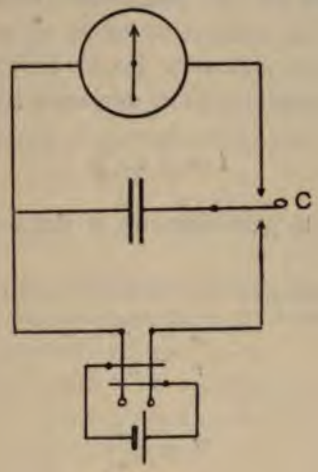


Fig. 99.

La différentielle logarithmique de l'expression précédente est

$$\frac{dV}{V} = \frac{de}{e} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} - \frac{d\alpha'_1}{\alpha'_1}.$$

L'erreur relative limite sur V s'obtient en supposant que les erreurs de lecture s'ajoutent, c'est à dire en changeant le signe de $\frac{d\alpha'_1}{\alpha'_1}$. On se place évidemment dans les meilleures conditions, en faisant en sorte que les élongations soient maxima. Pour cela, on choisit, dans un condensateur gradué, des capacités convenables. Il est possible de modifier les élongations en réglant un shunt disposé entre les bornes du galvanomètre, mais il faut alors tenir compte du terme correctif pour l'amortissement produit par le shunt.

Cette méthode, se pratiquant à circuit ouvert, a l'avantage de n'exiger qu'une dépense d'électricité négligeable ; à ce titre, elle se recommande spécialement pour la mesure de la force électromotrice des piles très polarisables.

Méthode du voltmètre. Voltmètres industriels. Cas des forces électromotrices alternatives. — Aux deux points dont on cherche

la différence de potentiel, pôles d'une pile, d'une dynamo ou extrémités d'un conducteur parcouru par un courant, on peut relier un galvanomètre auquel on ajoute une résistance assez grande pour que le courant qui passe dans l'appareil ne modifie pas, d'une manière appréciable, la différence de potentiel cherchée.

On obtient au galvanomètre une déviation α telle que

$$i = \frac{V}{r} = \frac{\alpha}{k},$$

r étant la résistance du galvanomètre et des bobines en série avec celui-ci.

En opérant de même avec un élément étalon e, on a

$$i' = \frac{e}{r} = \frac{\alpha'}{k},$$

d'où

$$V = e\frac{\alpha}{\alpha'}.$$

La discussion de cette méthode est analogue à celle de la méthode balistique précédente. La précision qu'on peut atteindre est plus grande que dans cette dernière parce que l'observation des déviations permanentes entraîne une erreur moindre que les lectures balistiques.

Si l'erreur de lecture s'élève à 0,01, par exemple, il faudra veiller à ce que le courant que débite la pile étalon ne modifie pas la force électromotrice de celle-ci au point d'occasionner une erreur du même ordre. Ainsi, avec l'élément Clark à vase poreux, on doit mettre en circuit une résistance de 10000 à 100000 ohms et l'on shunte le galvanomètre, si ce dernier est trop sensible.

Dans le cas où l'on utilise un galvanomètre à réflexion dont les indications sont proportionnelles aux courants, on facilite les observations, si celles-ci sont nombreuses, en réglant la résistance additionnelle et le shunt de telle manière qu'une division représente un volt ou un multiple exact du volt. On réalise de la sorte un *voltmètre* qui permet la détermination des différences de potentiel par une simple lecture. On ne perdra pas de vue, en employant un tel instrument, que sa résistance doit être suffisamment grande pour que le courant qui le traverse ne modifie pas la différence de potentiel à mesurer.

Si celle-ci est prise aux extrémités d'un conducteur ayant 0,01 ohm de résistance, on ne commet qu'une erreur de 0,001 en faisant usage d'un voltmètre dont la résistance n'est que 10 ohms. Si, au contraire, on mesure la force électromotrice d'une pile dont la résistance intérieure est 5 ohms, le même appareil donne lieu à une forte erreur puisque dans ces conditions la différence de potentiel aux bornes de la pile en circuit avec le voltmètre est non pas e, mais

$$e \times \frac{10}{15} = 0{,}67\ e.$$

Il ne faut pas oublier davantage que la graduation d'un voltmètre n'est correcte qu'à la condition expresse que la résistance de l'instrument soit invariable.

Pour éviter les modifications de résistance dues au courant ou aux variations de la température ambiante, il est recommandable de n'employer pour l'enroulement de ces instruments, ainsi que pour les shunts et les résistances en série, que des alliages, tels que le maillechort ou la manganine, sur lesquels les effets des changements de température sont faibles ou nuls. De plus, on aura soin de ne laisser passer le courant que pendant le temps nécessaire à la mesure, afin de ne pas occasionner d'échauffements excessifs.

On peut toutefois négliger l'influence de la température avec un galvanomètre à bobine en cuivre, si celle-ci a une résistance très faible comparativement à celles des résistances additionnelles, faites en maillechort ou en manganine.

Il est aisé d'étendre les limites d'emploi d'un voltmètre en y adjoignant des résistances en série de manière à modifier la résistance totale du circuit de l'appareil. Si, à une résistance r, correspond 1 division par volt, une résistance $10\ r$, obtenue en ajoutant $9\ r$ en série, porte la valeur d'une division à 10 volts.

Lorsqu'on se sert du galvanomètre Deprez et d'Arsonval comme voltmètre, il est nécessaire d'utiliser un shunt, afin d'amortir les oscillations, à moins qu'on n'ait enroulé la bobine sur un cadre en aluminium, dans lequel se développent des courants amortisseurs. On peut agir sur le shunt pour modifier la sensibilité du voltmètre. Avec une bobine mobile en maillechort enroulée sur un cadre d'aluminium, et quelques résistances en série et en

dérivation également en maillechort, on est à même de mesurer tous les voltages usités dans les applications. Une telle disposition peut être employée pour graduer les voltmètres industriels pour courants continus.

Dans l'industrie électrique, on a continuellement à mesurer des différences de potentiel. On se sert, à cet effet, de voltmètres industriels à lecture directe, gradués en volts.

On utilise dans leur construction toutes les dispositions préconisées pour les ampèremètres, en ayant soin de tenir compte des conditions spéciales énoncées ci-dessus. Comme, en général, ces diverses combinaisons ne procurent pas une grande sensibilité, on enroule, autour de l'équipage mobile, une bobine en fil de cuivre comportant beaucoup d'ampères-tours et l'on emploie une résistance additionnelle en maillechort ou en manganine.

Souvent les voltmètres n'ont à marquer exactement qu'entre des limites peu écartées. Ainsi, dans les distributions à 110 volts pour l'alimentation des lampes à incandescence, on exige simplement que l'instrument soit sensible aux environs de la tension normale, où une différence de voltage de 0,01 occasionne une variation de l'intensité lumineuse de 0,05.

Lorsqu'on a affaire à des tensions très élevées, l'énergie absorbée par le voltmètre est importante à considérer lorsque l'appareil doit rester en circuit, comme c'est le cas sur les tableaux de distribution. Il faut alors chercher des instruments aussi sensibles que possible, qui fonctionnent avec des courants très faibles. Les voltmètres électrostatiques sont les plus recommandables sous ce rapport, puisqu'avec eux la dépense d'énergie est nulle.

Dans le cas particulier des forces électromotrices alternatives, les voltmètres à aimant ne conviennent pas. Il faut employer des appareils à fer doux, des appareils à dilatation, des électrodynamomètres ou des appareils électrostatiques. Outre qu'ils doivent satisfaire aux conditions imposées aux voltmètres à courant continu, ces appareils ne peuvent présenter qu'une self-induction négligeable, afin que le courant qui les traverse soit en concordance de phase avec la différence de potentiel à mesurer. Dans les appareils à bobines, on arrive à satisfaire approximativement à cette nécessité, en enroulant aussi peu de spires que possible sur

les bobines et en ajoutant en série avec celles-ci une grande résistance à double enroulement.

M. Evershed a proposé la disposition suivante qui évite toute correction en ce qui concerne la fréquence du courant. En dérivation sur la résistance non inductive r, il place un petit condensateur de capacité c telle que $c\,r^2 = \mathcal{L}$, $\mathcal{L}$ étant la self-induction de la bobine du voltmètre.

Afin d'éviter l'emploi de voltmètres très résistants pour mesurer les tensions alternatives élevées, on se contente parfois de réduire cette tension par le moyen d'un petit transformateur. Il faut alors régler l'appareil pour la fréquence requise.

On gradue ordinairement les voltmètres industriels par comparaison avec un galvanomètre étalon employé comme voltmètre par la méthode décrite précédemment.

Voltmètre Weston. — La fig. 101 montre un modèle d'électrodynamomètre conçu par M. Weston pour servir de voltmètre. Le

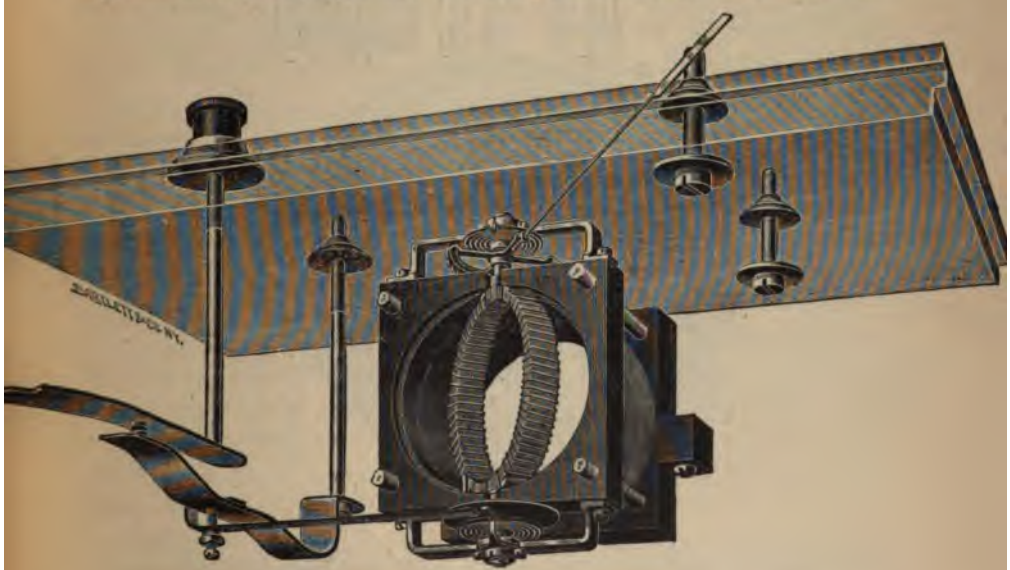


Fig. 101.

mode de fixation et de direction de la bobine mobile est le même que dans l'ampèremètre de ce constructeur. L'arrêt des oscillations

du cadre mobile est provoqué par une pièce frottant sur un disque que porte l'axe de rotation. Pour déterminer ce frottement amortisseur, on pousse sur le bouton figuré à la gauche du dessin.

Voltmètre Cardew. — Les appareils à dilatation constituent d'excellents voltmètres pour les tableaux de distribution, parce qu'ils ne sont pas influencés par les champs parasites. Grâce à leur faible self-induction, ils peuvent être employés aussi bien

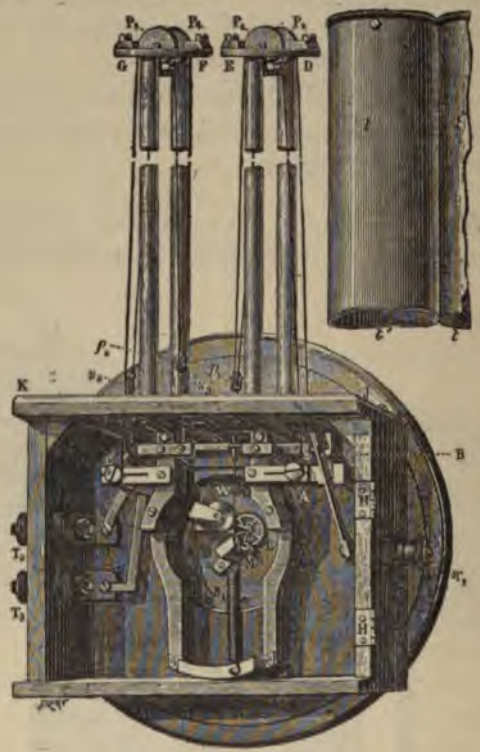


Fig. 102.

pour les courants alternatifs que pour les courants continus. Indépendamment de l'appareil Hartmann et Braun déjà décrit, nous citerons le voltmètre Cardew, qui a été employé en premier lieu pour cet usage.

Un fil mince, en alliage platine-argent, fixé par ses extrémités

à deux vis A et B, passe sur une série de poulies en ivoire, P_1, p_1, P_2. La poulie mobile p_1 est tirée par un fil de soie qui fait un tour autour d'une poulie W et se termine par un ressort à boudin S_1. Lorsqu'un courant passe dans le fil d'alliage, celui-ci se dilate, la poulie p_1 descend sous l'action du ressort, et la rotation de la poulie W, amplifiée par un rouage L M, est indiquée par une aiguille sur un cadran dont la figure 102 montre la face postérieure.

Un second fil, semblable au premier, est mis à la suite de celui-ci lorsque les tensions à mesurer sont trop élevées.

Les tiges supportant les poulies doivent avoir le même coefficient de dilatation que les fils, pour que les variations de la température ambiante n'amènent pas une dilatation différentielle et un déplacement de l'index de l'appareil. On les constitue en un alliage de 1 de fer et 3 de cuivre. Un double tube de laiton noirci à l'intérieur protège les fils.

Ces appareils à dilatation absorbent des courants assez intenses; ils ont l'inconvénient de consommer beaucoup d'énergie lorsqu'ils sont maintenus en circuit.

Méthodes de réduction à zéro. Méthode de compensation de Poggendorf. — Les méthodes de réduction à zéro que nous allons passer en revue procurent une exactitude plus grande que la méthode par comparaisons successives, parce qu'elles utilisent le galvano-

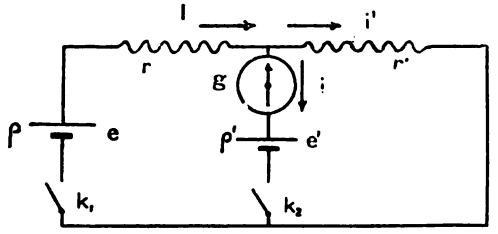


Fig. 103.

mètre au voisinage de la position de repos de l'équipage mobile et qu'elles permettent par suite de donner à l'instrument toute sa sensibilité, tandis que dans la méthode par comparaisons successives, on est ordinairement obligé d'atténuer la sensibilité de

l'appareil par des shunts. Les méthodes de réduction à zéro rendent possible l'emploi d'un galvanomètre dont la loi n'est pas connue. Pour fixer les idées, nous supposerons dans ce qui suit qu'il s'agit de déterminer la force électromotrice d'une pile par comparaison avec celle d'un élément étalon.

Soient e et e' les forces électromotrices des piles comparées. On met en circuit la pile de force électromotrice la plus grande, que nous supposerons peu polarisable, avec deux résistances variables r, r' et l'on règle celles-ci jusqu'à ce qu'un galvanomètre mis en série avec l'autre pile, comme l'indique la figure, ne dévie plus. On abaisse la clef k_1, d'abord, puis la clef k_2 et l'on relève les deux clefs, en commençant par k_2, aussitôt qu'on a constaté une déviation.

En appelant ρ et ρ' les résistances des deux piles, on trouve par l'application des lois de Kirchhoff

$$\begin{aligned} \mathrm{I} &= i + i' \\ e &= \mathrm{I}\,(r+\rho) + i''\,r' \\ e' &= i''\,r' - i\,(\rho' + g); \end{aligned}$$

d'où, en éliminant i'' et I,

$$i = \frac{er' - (r+\rho+r')\,e'}{r\,(r+\rho) + (\rho'+g)\,(\rho+r+r')} = \frac{\alpha}{k} \qquad (1).$$

Lorsque la déviation α s'annule $i = o$, d'où

$$e = \frac{r+\rho+r'}{r'}\,e'.$$

Pour estimer l'approximation dont la méthode est susceptible, appelons $d\alpha$ l'erreur de lecture possible et posons

$$\frac{e}{e'} = n = \frac{r'+\rho+r}{r'} \qquad (2).$$

L'équation (1) devient

$$\frac{e'\,n\,r'\,(r+\rho+r')\,e'}{r'\,(r+\rho) + (\rho'+g)\,(\rho+r+r')} = \frac{\alpha}{k};$$

on en déduit l'erreur correspondante sur n

$$dn = d\alpha\,\frac{\left\{r'\,(r+\rho) + (\rho'+g)\,(\rho+r+r')\right\}^2}{k\,e'\,r'^2}.$$

En introduisant dans cette expression la condition

$$\rho + r = r'(n - 1),$$

satisfaite quand la résistance r' est parfaitement réglée, on voit qu'un léger déréglage, accusé par une déviation $d\alpha$ du galvanomètre, entraîne sur la valeur du rapport des deux forces électromotrices, une erreur

$$dn = d\alpha \frac{r'(n - 1) + n(\rho' + g)}{ke'}.$$

L'erreur dn est d'autant plus faible que la résistance r' est plus petite

Cette conclusion tendrait à faire diminuer autant que possible les résistances r et r', car la première est liée à la seconde par la relation

$$r = r'(n - i) - \rho.$$

Mais, dans le calcul précédent, il n'est tenu compte que de l'erreur de lecture, tandis que d'autres considérations doivent intervenir. Si l'on met des résistances minimes en circuit avec la pile e, celle-ci se polarise et la force électromotrice e est altérée. De plus, comme les résistances auxiliaires sont prises dans des boîtes et ne se règlent généralement qu'à un ohm près, on n'arrive pas à annuler la déviation. Il est vrai qu'on pourrait interpoler, à la condition toutefois que les courants donnant des écarts à droite et à gauche du zéro de l'échelle ne soient pas trop différents. Soient $+\alpha$ l'écart pour une résistance r' et $-\alpha'$ celui que provoque une résistance $r' + 1$. La résistance correspondant au repos du galvanomètre est, sous la restriction susdite, $r' + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}$. Enfin, l'influence d'une erreur commise sur la valeur de la résistance intérieure ρ de la pile est d'autant plus grande que r et r' sont plus faibles.

Pour toutes ces raisons, lorsqu'on dispose d'un galvanomètre sensible, on choisit les résistances r et r' assez élevées pour qu'une variation de 1 ohm dans l'une d'elles n'occasionne qu'une déviation à peine appréciable. On peut alors, en général, négliger la résistance intérieure ρ.

On déduit de (2) la valeur de l'erreur relative commise sur n. En supposant ρ négligeable, r constant et r' variable, on a

$$\frac{dn}{n} = \frac{r\,dr'}{(r'+r)\,r'}.$$

La valeur du second membre est inférieure à $\frac{r}{(r'+r)\,r'}$ si l'erreur dans le réglage de r' ne dépasse pas 1 ohm.

Lorsque la pile e' est très sujette à se polariser, comme c'est le cas pour l'élément Clark, on commence le réglage en introduisant en série avec le galvanomètre une grande résistance qu'on diminue progressivement à mesure qu'on approche de l'équilibre. Lorsque ce dernier est atteint, on laisse reposer la pile, pour faire disparaître toute trace de polarisation; après quoi l'on vérifie si l'équilibre se maintient.

Si la pile non polarisable e a une force électromotrice inférieure à e', on réunit plusieurs éléments en série, après s'être assuré, par une mesure préalable, que les divers éléments donnent la même force électromotrice.

Ainsi, pour comparer l'élément Daniell à l'élément Clark à vase poreux, on utilise deux couples du premier type; on a d'ailleurs soin d'introduire une résistance de 100 000 ohms en série avec l'étalon Clark pour commencer le réglage.

Quand on ne dispose pas de résistances r et r' assez grandes pour permettre de négliger la résistance ρ, on établit un second régime d'équilibre en ajoutant respectivement à r et r' des résistances r_1 et r'_1.

On aura ainsi une nouvelle relation

$$\frac{e}{e'} = \frac{r' + r'_1 + \rho + r + r_1}{r' + r'_1}. \qquad (3)$$

De la comparaison des équations (2) et (3) on déduit

$$\frac{e}{e'} = \frac{r'_1 + r_1}{r'_1}.$$

Méthode de Lacoine. — La méthode de Lacoine, qui présente quelque analogie avec celle de Poggendorff, consiste à reporter la pile e' à laquelle on compare e, à la suite de la résistance r', au

lieu de la placer dans la branche du galvanomètre. Cette disposition met les deux piles dans les mêmes conditions de débit en les

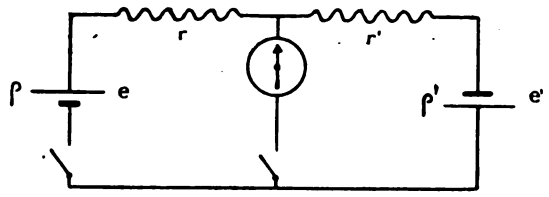


Fig. 104.

reliant en tension et non en opposition comme dans la méthode précédente. Elle ne peut convenir si l'une des piles est très polarisable.

En appliquant les lois de Kirchhoff, il est facile de voir que le courant s'annule dans le galvanomètre lorsque la condition suivante est satisfaite

$$\frac{e}{e'} = \frac{r+\rho}{r'+\rho'}.$$

Cette méthode donne lieu à une discussion tout à fait semblable à celle de la méthode de Poggendorff.

Potentiomètre de Clark. — Si l'on doit comparer deux piles polarisables, on se sert avec avantage du procédé de mesure suivant :

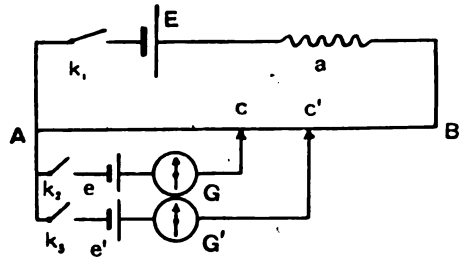


Fig. 105.

Une pile ou un accumulateur auxiliaire E, capable de fournir un courant constant, est placé en circuit avec rhéostat *a* et un conducteur résistant, relié aux points A et B. Les deux piles à comparer

sont mises en dérivation avec des galvanomètres sur une partie de la résistance A B. On règle la position des contacts à curseur c et c' jusqu'à ce que les galvanomètres G et G′ reviennent au zéro. En désignant par i le courant débité par la pile E, par r et r' les résistances A C, A C′, on a

$$e = ir$$

$$e' = ir'$$

d'où

$$\frac{e}{e} = \frac{r}{r'}.$$

Il est facile de voir que la précision de la mesure dépend de l'approximation avec laquelle on peut évaluer les résistances r et r', laquelle dépend elle-même de la sensibilité des galvanomètres et de la plus petite fraction appréciable de la résistance du conducteur A E.

De

$$\frac{e}{e'} = n = \frac{r}{r'},$$

on tire

$$dn = \frac{r'dr - rdr'}{r'^2}$$

et

$$\frac{dn}{n} = \frac{r'dr - rdr'}{rr'}.$$

Si les erreurs dr et dr' sont égales et prises avec des signes contraires, on obtient

$$\frac{dn}{n} = \frac{r' + r}{r\,r'}\,dr.$$

Lorsque les résistances r et r' sont peu différentes, on voit que l'erreur limite commise sur n est double de l'erreur de réglage, car on a alors

$$\frac{dn}{n} = 2\,\frac{dr}{r}.$$

Pour effectuer la mesure, on commence par régler la position du curseur c en observant le galvanomètre G, puis celle du curseur c' à l'aide du galvanomètre G′. On pourrait se passer du

galvanomètre G′, puisque si la position du curseur c' n'est pas réglée, un courant traverse G au moment où l'on abaisse la clé k_3, grâce à la variation de différence de potentiel que le courant passant par e' détermine en c. Cependant, on obtient plus de sensibilité avec deux instruments.

Si l'on ne dispose que d'un appareil, il est préférable de placer *successivement* les deux piles à comparer dans le même circuit dérivé et de régler les positions du curseur jusqu'à obtenir l'équilibre dans les deux cas. Ce procédé suppose que le courant de la pile E est resté invariable. Pour s'en assurer, on dispose une clef permettant de substituer rapidement la pile e' à la pile e et l'on alterne les opérations.

Dans le potentiomètre de Clark, la résistance A B est formée par un long fil calibré et tendu suivant une règle divisée. La comparaison des résistances r et r' est ainsi ramenée à la comparaison de deux longueurs.

Comme la mesure de celles-ci peut entraîner une erreur relative assez forte, lorsque la longueur du fil n'est pas très grande, M. Crompton dispose à la suite du fil 15 bobines de même résistance que ce dernier et ne se sert du fil que pour achever le réglage réalisé d'une manière grossière avec les bobines.

Appareil de compensation de M. Feussner (1). — M. Feussner a combiné sur le principe de la méthode de compensation un appareil qui permet de mesurer toutes les tensions comprises entre 0,014 volt et 1400 volts, et, si l'on dispose de résistances étalons de forte section, toutes les intensités de courant à partir de 0,0001 jusqu'à 1000 ampères, avec une approximation de 0,1 pour 100.

La fig. 106 indique le schéma de cette disposition, qui est d'une ressource précieuse dans les laboratoires d'étalonnage.

L'appareil comporte un élément étalon de Clark p modèle du Reichsanstalt, qui sert de base de comparaison pour les tensions, une résistance A de 100000 ohms, une boîte de résistance B

(1) Feussner, *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1890, p. 113.

à fiches, contenant 99990 ohms, un rhéostat à manette C comprenant 9 résistances de 1000 ohms, une caisse de résistances à fiches D graduée de 0,1 à 50 ohms et un rhéostat à manette E formé de 9 bobines de 100 ohms. Une dernière boîte D', contenant les principales résistances de D, est encore adjointe au système, en vue de permettre de maintenir le courant fourni par une pile auxiliaire P, sensiblement constant dans le circuit principal : à cet effet, on bouche dans D' les résistances débouchées en D pour le réglage.

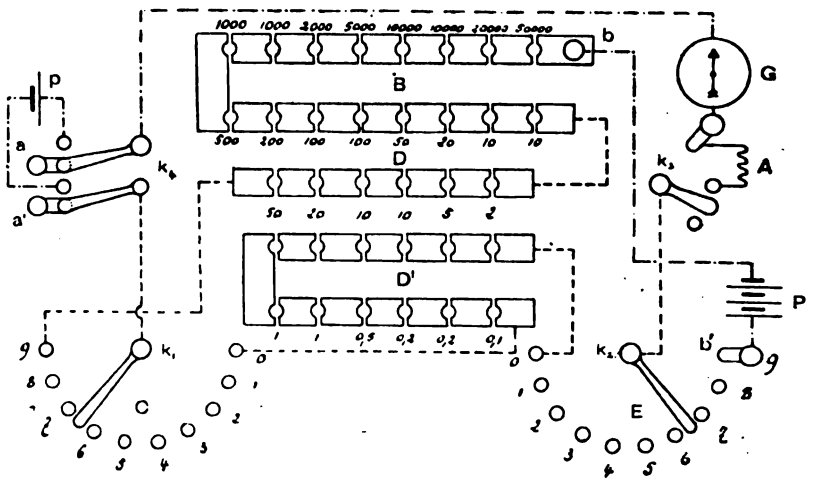


Fig. 106.

Pour comparer un élément de pile à l'élément Clark, on agit sur les manettes k_1 et k_2 et sur les résistances D, de manière à obtenir l'équilibre du galvanomètre G lorsque le commutateur k_1 est relié successivement à l'élément Clark et à la pile étudiée, qu'on raccorde aux bornes a, a'. Afin d'éviter la polarisation de l'étalon Clark, on commence les tâtonnements en introduisant les 100000 ohms à la suite du galvanomètre, à l'aide de la clef k_3. On ne supprime cette résistance additionnelle que pour le réglage définitif.

Si l'on doit déterminer une différence de potentiel inférieure à 1,4 volts, entre deux points d'un circuit parcouru par un courant continu, on relie ces points aux bornes a et a' et l'on procède

comme ci-dessus. Si la résistance totale du circuit de la pile auxiliaire P est de 100000 ohms et si une résistance r comprise entre les manettes k_1 et k_2, assure le repos du galvanomètre, lorsque la clef k_4 est reliée au couple étalon, on a, en désignant par e la force électromotrice de la pile auxiliaire,

$$\frac{e}{100000} = \frac{1{,}434 - 0{,}001\,(t^\circ - 15^\circ)}{r} = \frac{1{,}449 - 0{,}001\,t^\circ}{r}.$$

Soit, d'autre part, V la différence de potentiel cherchée, pour laquelle l'équilibre est obtenu au moyen d'une résistance r'

$$\frac{e}{100000} = \frac{V}{r'};$$

d'où

$$V = (1{,}449 - 0{,}001\,t^\circ)\,\frac{r'}{r}.$$

Pour mesurer les différences de potentiel comprises entre 14 et 1 400 volts, on applique ces tensions aux bornes b, b' auxquelles, dans le cas précédent, était reliée la pile auxiliaire.

Dans ces conditions,

$$V = \frac{(1449 - t^\circ)\,100}{r}.$$

Enfin, pour évaluer des intensités de courant à l'aide de l'appareil de M. Feussner, on fait passer ces courants dans des résistances étalonnées de valeur convenable, aux bornes desquelles on mesure la différence de potentiel; le rapport de la tension observée à la résistance de l'étalon fait connaître l'intensité cherchée. Les résistances destinées à la mesure des courants intenses sont composées de bandes de manganine immergées dans un hydrocarbure liquide refroidi par l'agitation.

Chapitre XIII.

MESURE DES RÉSISTANCES.

Méthodes indirectes. Méthode de Weber. — Pour la détermination de l'étalon de l'ohm, on a dû évaluer la résistance d'un circuit sans se servir d'une résistance de comparaison. Différentes méthodes ont été employées dans ce but; l'une des plus simples est celle du cadre tournant de Weber. Une bobine circulaire de grand diamètre est disposée de telle manière que le plan de ses spires soit normal à celui du méridien magnétique, et peut tourner autour d'un diamètre vertical. Elle est reliée par l'intermédiaire de deux frotteurs à un galvanomètre des tangentes situé à une distance suffisante pour que l'aiguille ne soit pas influencée directement par la bobine.

Si l'on fait exécuter au cadre mobile une demi-révolution, il s'y développe, par induction électromagnétique, une quantité d'électricité représentée par

$$q = \frac{2\,\mathrm{H}\,n\,s}{\mathrm{R}},$$

H désignant la composante horizontale du champ terrestre, n le nombre de spires du cadre, s la surface moyenne d'une spire et R

la résistance totale du circuit. Cette quantité d'électricité, traversant le galvanomètre, amène une élongation α, telle que

$$\frac{2\,H\,s\,n}{R} = \frac{H'}{G}\,\frac{T_0}{\pi}\,\alpha\,e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tang}\frac{\pi}{\lambda}}.$$

Si le champ magnétique terrestre a la même intensité aux endroits où se trouvent le galvanomètre et le cadre tournant, ce qu'on peut vérifier en comparant les durées d'oscillation d'une même aiguille aimantée en ces deux points, il vient

$$R = 2\,n\,s\,G\,\frac{\pi}{T_0}\cdot\frac{1}{\alpha\,e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tang}\frac{\pi}{\lambda}}}.$$

La formule montre l'exactitude avec laquelle on doit mesurer G, T_0 et α, suivant l'approximation avec laquelle on veut obtenir la valeur de R. En négligeant le facteur d'amortissement et en admettant que les erreurs s'ajoutent, on a, en effet, pour l'erreur limite,

$$\frac{dR}{R} = \frac{ds}{s} + \frac{dG}{G} + \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Méthode de la perte de charge. — Voici une autre méthode de mesure indirecte qui peut être appliquée quand il s'agit d'évaluer

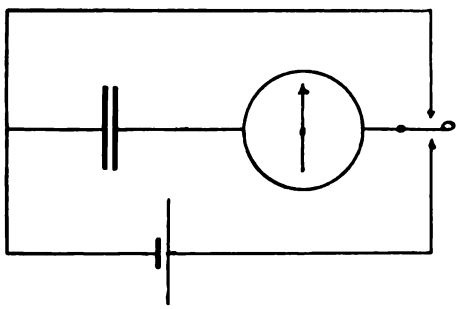


Fig. 107.

des résistances très élevées pour lesquelles il est difficile de se procurer des étalons du même ordre. Soit à mesurer la résistance d'isolement entre les armatures d'un condensateur.

On charge le condensateur et l'on détermine la différence de potentiel des armatures, soit au moyen d'un électromètre, soit en la déduisant de l'élongation accusée par un galvanomètre intercalé dans le circuit de charge comme le montre la figure 107. On laisse ensuite le condensateur se décharger à travers son propre diélectrique en isolant le levier de la clef de décharge, et, au bout d'un temps t, on observe de nouveau la différence de potentiel, soit avec un électromètre, soit en en déchargeant les armatures dans un galvanomètre. On sait qu'on a, entre la résistance R du diélectrique, la capacité c du condensateur et les différences de potentiel V_0 et V_t, la relation

$$t = c\,R \log_e \frac{V_0}{V_t}. \qquad (^1)$$

Si c est exprimé en microfarads, R est donné en mégohms.

De cette relation on tire

$$R = \frac{t}{c \log_e \frac{V_0}{V_t}} = 2{,}3 \frac{t}{c \log_e \frac{V_0}{V_t}}.$$

Le rapport des différences de potentiel est d'ailleurs ramené au rapport de deux lectures électrométriques ou galvanométriques.

$$R = 2{,}3 \frac{t}{c \log_e \frac{\alpha_0}{\alpha_t}} = 2{,}3 \frac{t}{c \log_e n}.$$

L'erreur relative résultant de l'inexactitude des lectures a pour expression

$$\frac{dR}{R} = \frac{\frac{\alpha_0\, d\alpha_t - \alpha_t\, d\alpha_0}{\alpha_t^2}}{\frac{\alpha_0}{\alpha_t} \log_e \frac{\alpha_0}{\alpha_t}} =$$

ou, en supposant $d\alpha_t = -d\alpha_0 = d\alpha$,

$$\frac{dR}{R} = \frac{n+1}{\log_e n} \frac{d\alpha}{\alpha_0}$$

---

(1) ERIC GERARD, *Leçons sur l'Électricité*, 4e édition, § 112.

L'erreur $\frac{dR}{R}$ est d'autant plus faible que α_0 est plus grand et le rapport $\frac{n+1}{\log_e n}$ plus petit. La valeur minima de ce rapport correspond à

$$\log_e n = \frac{n+1}{n}$$

d'où

$$n = e^{\frac{n+1}{n}} = e \times e^{\frac{1}{n}} = e\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{1}{2n^2} + \dots\right).$$

En ne considérant que les deux premiers termes de la série, on trouve

$$n = 3{,}5 \quad \text{(M. de Weydlich)}.$$

Lorsque la résistance à mesurer est très élevée, le temps correspondant à la condition précédente est beaucoup trop long.

Dans cette méthode, comme dans toutes celles qui se rapportent à la mesure des résistances élevées, il faut assurer avec un soin extrême l'isolement de tous les appareils insérés dans les circuits. Les pièces en ébonite destinées à éviter les déperditions d'électricité doivent être soigneusement nettoyées et séchées ; les fils de connexion en contact avec les tables d'expériences doivent être recouverts d'une forte couche de caoutchouc ou de gutta-percha. Enfin, la pile doit être supportée sur des isolateurs. Sans ces précautions, il peut arriver que la résistance d'isolement du circuit soit moindre que celle à mesurer.

La méthode de la perte de charge implique l'hypothèse que la résistance d'un diélectrique est indépendante de la tension à laquelle celui-ci est soumis, ce qui n'est pas tout à fait exact ; aussi ne faut il pas viser à une exactitude supérieure au 0,02 dans ce genre de mesures.

Cette même méthode peut être employée pour mesurer des grandes résistances quelconques. Si l'on dispose d'un condensateur dont l'isolement est suffisamment élevée, on procède comme ci-dessus, en dérivant la résistance à étudier x sur les armatures. On trouve ainsi la résistance combinée $\frac{R\,x}{R+x}$ du condensateur et de x. Si la résistance inconnue x est assez petite par rapport à R, la mesure donne sensiblement sa valeur.

Méthode par le voltmètre et l'ampèremètre. — La mesure des résistances très faibles exige des dispositions spéciales qui seront décrites ci-après. Dans les usines où l'on doit mesurer la résistance d'induits de dynamos, qui n'atteint souvent qu'une faible fraction d'ohm, on se sert fréquemment de la méthode indirecte suivante. On envoie dans la résistance inconnue un courant mesuré à l'aide d'un ampèremètre, et l'on relève la chute de potentiel que la résistance occasionne au moyen d'un voltmètre gradué pour les faibles tensions. Le rapport de l'indication de ce dernier appareil à l'intensité du courant, représente la résistance cherchée. L'erreur limite qu'on peut commettre sur la valeur de celle-ci est la somme des erreurs limites qu'entraîne l'emploi des deux instruments. Il faudra donc utiliser un courant capable d'amener les index de ces appareils vers l'extrémité des échelles et avoir soin de ne laisser passer le courant que pendant un temps assez court pour ne pas modifier d'une manière appréciable la température du conducteur soumis à l'essai.

Méthodes directes. Méthode par comparaisons successives. — Cette méthode repose sur la comparaison des courants que débitent des piles, dont les forces électromotrices sont dans un rapport déterminé, quand on les relie à la résistance inconnue et à une résistance étalon. Elle s'applique le plus souvent à la mesure des résistances de l'ordre du mégohm, très supérieures par conséquent à la résistance des étalons, dont on dispose généralement.

On forme le circuit ci-contre au moyen d'un galvanomètre sensible, pourvu d'un shunt, de la résistance étalon qu'on choisit aussi élevée que possible et d'un élément de pile.

On constate un courant

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{r + \rho + \frac{g}{m}} \times \frac{1}{m}.$$

r désigne la résistance de l'étalon, ρ celle de la pile, dont la force électromotrice est e, g celle du galvanomètre et m le pouvoir multiplicateur du shunt.

On substitue à l'étalon la résistance inconnue x. Dans le cas

où celle-ci est constituée par la gaine isolante d'un câble, on protège le galvanomètre par une clef qui met l'appareil en court-circuit au moment où l'on abaisse l'inverseur de la pile, afin d'éviter que le courant de charge du câble ne projette trop vivement l'équipage mobile. Pour obtenir une déviation perma-

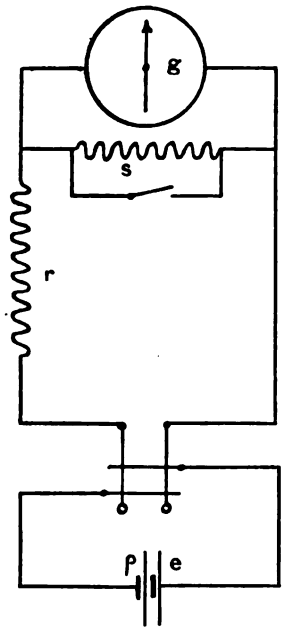


Fig. 108.

nente convenable, on est amené à employer n éléments de pile, dont les forces électromotrices ont été comparées à celle de l'élément utilisé d'abord par une mesure préalable, et à réduire le pouvoir multiplicateur du shunt à m'.

On a alors, dans le cas où tous les éléments de pile sont identiques à e,

$$i' = \frac{\alpha'}{k} = \frac{ne}{x + n\rho + \frac{g}{m'}} \times \frac{1}{m'}$$

d'où

$$x = \frac{m}{m'} \frac{n\alpha}{\alpha'} \left(r + \rho + \frac{g}{m}\right) - \left(n\rho + \frac{g}{m'}\right)$$

$\rho + \frac{g}{m}$ est généralement négligeable devant r. Souvent même $n\rho + \frac{g}{m'}$, le second terme, peut être négligé devant le premier. L'équation se réduit alors à

$$x = \frac{\alpha}{\alpha'} \frac{mn}{m'} r.$$

Comme les erreurs de lecture s'ajoutent dans l'estimation de l'erreur limite commise sur x, il faut chercher à obtenir des déviations aussi grandes que possible.

Comme on l'a déjà fait remarquer dans la mesure des grandes résistances, il faut veiller d'une manière toute spéciale à l'isolement des diverses parties des circuits, afin d'éviter les erreurs grossières que peuvent causer les courants de perte. Ainsi, comme il est assez difficile d'isoler parfaitement les piles, il faut avoir soin, lorsqu'on mesure le courant qui traverse le diélectrique d'un câble, de placer le galvanomètre, non entre la pile et la terre, mais entre la pile et le câble, afin que le courant de perte de la pile ne traverse pas le galvanomètre.

On pourrait supprimer le shunt dans la seconde expérience ; mais les cahiers des charges relatifs aux câbles prescrivent une tension d'essai considérable, qui oblige le plus souvent à shunter le galvanomètre.

Lorsqu'on a une série de mesures à effectuer, on détermine la constante du galvanomètre, correspondant à un micro-ampère, au commencement des expériences et l'on exprime les résistances en mégohms, d'après la formule

$$x = \frac{k}{\alpha'} n e \frac{1}{m'} - \left(n\rho + \frac{g}{m}\right).$$

Ohmmètres. — Imaginons un galvanomètre dont l'aiguille mobile soit soustraite, autant que possible, à l'action terrestre, grâce à la présence d'une seconde aiguille réalisant un système astatique ou d'un aimant directeur antagoniste, par exemple. Sur l'aiguille agissent deux cadres galvanométriques disposés à angle droit. L'équipage mobile prend dans ces conditions une position d'équilibre dépendant du rapport des courants qui passent dans les deux

bobines. En soumettant celles-ci à une même différence de potentiel, la position d'équilibre est déterminée par les résistances des deux circuits dérivés. Pour appliquer ce principe à la mesure des résistances, on gradue l'échelle du galvanomètre en insérant des résistances variables en série avec l'un des multiplicateurs; on inscrit ces résistances sur la graduation, de façon à ce que l'appareil renseigne directement les ohms.

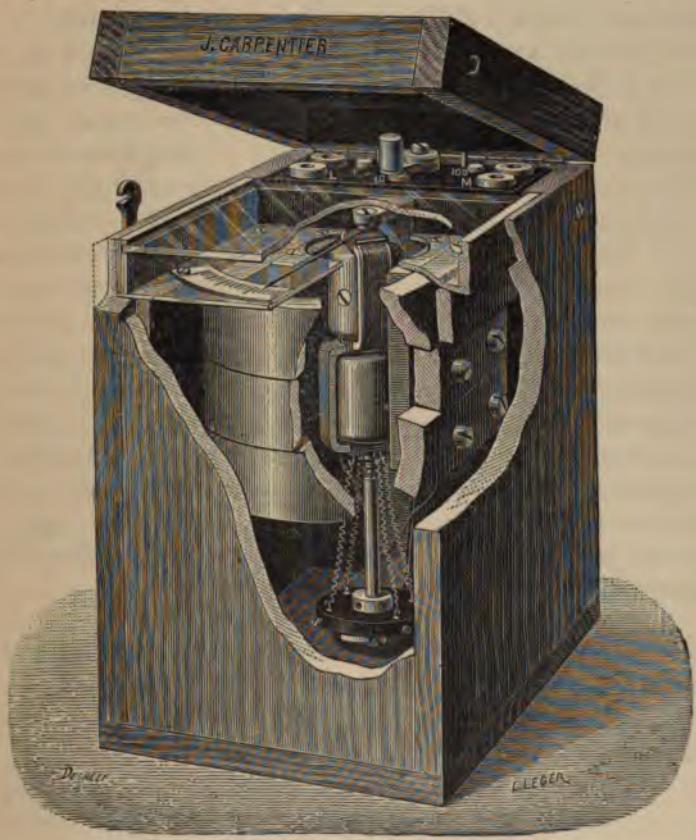


Fig. 109.

MM. Ayrton et Perry, ainsi que M. Evershed, ont réalisé des appareils de ce genre servant à estimer approximativement la résistance d'isolement des circuits. Par l'insertion d'un shunt, de pouvoir multiplicateur connu, 100 par exemple, entre les bornes

de la bobine appartenant au circuit de résistance invariable, on peut lire sur la même graduation des résistances 100 fois plus grandes.

Pour rendre l'influence du champ terrestre extérieur tout à fait négligeable devant l'action des bobines, on fait usage d'une force électromotrice assez grande. M. Evershed emploie une petite machine magnéto-électrique à courants redressés développant environ 100 volts. Il est d'ailleurs avantageux de soumettre les circuits essayés à une différence de potentiel assez élevée.

M. Carpentier a utilisé le galvanomètre à aimant fixe à la construction d'un ohmmètre qui est moins influencé que les appareils à aiguille aimantée par les machines dynamo-électriques, fig. 110. L'équipage mobile, pivotant entre deux pointes dans des chapes en agate, comporte deux bobines orientées à angle droit et entourant des noyaux superposés en fer doux. Les pièces polaires de l'aimant fixe sont planes afin que le couple électromagnétique auquel chacun des cadres mobiles est soumis varie, pour un même courant, avec l'écart angulaire. Le courant est amené aux cadres par des boudins flexibles. Pour rendre l'effort de torsion de ceux-ci négligeable, M. Carpentier utilise également une petite machine magnéto-électrique donnant 120 volts à 100 tours. L'induit de cette machine est partagé en huit sections et le collecteur comprend huit lames afin que les variations du courant ne soient pas trop considérables. Sans cette précaution, les effets de charge qui troublent les mesures d'isolement des câbles pourraient fausser considérablement les résultats.

Méthode par réduction à zéro. Méthode du galvanomètre différentiel. — Plusieurs cas sont à considérer :

1° La résistance à mesurer est plus grande que celle des enroulements du galvanomètre différentiel, fig. 110.

On met alors la résistance inconnue et la boîte de résistance étalon en série chacune avec l'une des bobines du galvanomètre. Lorsque l'équipage mobile demeure au zéro, on a

$$x = r.$$

Avec un galvanomètre sensible, il faut, pour commencer le réglage, réduire la force électromotrice, car il serait trop difficile de shunter également les deux circuits galvanométriques. Pour

cela, on relie la pile à une résistance sur une partie de laquelle on dérive le galvanomètre. Lorsque le réglage est à peu près terminé, on peut utiliser la force électromotrice totale.

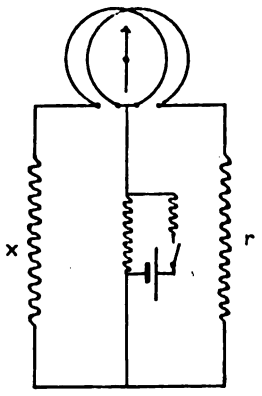


Fig. 110.

Généralement, la résistance de comparaison n'est pas un rhéostat réglable par degrés insensibles, mais une boîte de résistance ordinaire, de sorte qu'on ne parvient pas à trouver une valeur de r pour laquelle la déviation s'annule. Soit α la déviation à droite obtenue avec une résistance r et α' la déviation à gauche que produit une résistance $r + 1$. Par interpolation, on déduit que

$$x = r + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}.$$

De là on tire

$$dx = \frac{\alpha' d\alpha + \alpha d\alpha'}{(\alpha + \alpha')^2} = \frac{d\alpha}{\alpha + \alpha'},$$

en cumulant les erreurs de lecture ; par suite

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\alpha}{x(\alpha + \alpha')} \quad (1).$$

Remarquons que, dans l'un des circuits galvanométriques, on a, en négligeant la résistance de la pile,

$$i = \frac{e}{g + r},$$

et, dans l'autre,

$$i' = \frac{e}{g + x}.$$

La différence $\frac{e}{g+r} - \frac{e}{g+x}$ correspond à la déviation α, et l'on a

$$\frac{\alpha}{k} = e\left(\frac{1}{g+r} - \frac{1}{g+x}\right).$$

De même

$$\frac{\alpha'}{k} = e\left(\frac{1}{g+x} - \frac{1}{g+r+1}\right);$$

d'où, en ajoutant membre à membre,

$$\frac{\alpha + \alpha'}{k} = \frac{e}{(g+r)(g+r+1)}, \text{ soit } \frac{e}{(g+x)^2}.$$

En remplaçant dans (1), il vient

$$\frac{dx}{x} = \frac{(g+x)^2\, d\alpha}{k\, e\, x}.$$

L'erreur relative est minima lorsque la fonction $\frac{k\,x}{(g+x)^2}$ est maxima.

Dans le cas d'un galvanomètre à aimant fixe, on a (chap. VI)

$$k = \frac{\mathcal{K}\, s\, n}{c},$$

et, à volume constant de la bobine galvanométrique,

$$g = A\, n^2,$$

donc

$$k = \frac{\mathcal{K} s \sqrt{\frac{g}{A}}}{c} = B\sqrt{g}$$

par suite,

$$\frac{kx}{(g+x)^2} = \frac{B\, x \sqrt{g}}{(g+x)^2}$$

Le maximum de cette expression correspond à

$$g = \frac{x}{3} \left(\text{M. De Bast}\right).$$

En pratique, si l'on a le choix entre plusieurs galvanomètres, on choisira celui dont la résistance de chacun des multiplicateurs se rapproche le plus de cette condition.

2° Lorsque les résistances à comparer sont beaucoup plus faibles que celle du galvanomètre, il est préférable d'adopter le couplage indiqué dans la fig. 111, les deux résistances étant mises en déri-

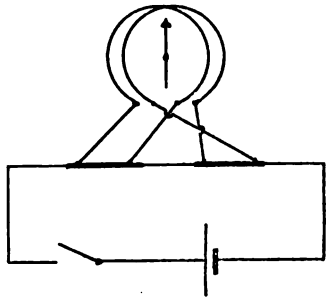


Fig. 111.

vation sur les deux circuits de l'instrument. Ce sont alors les différences de potentiel aux extrémités des résistances comparées qui produisent les courants traversant le galvanomètre. Les

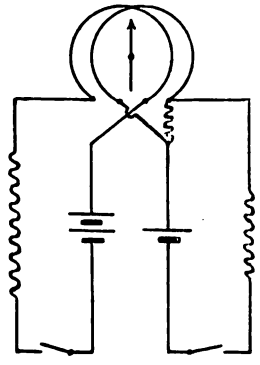


Fig. 112.

résistances de contact, qui jouent un rôle important dans la mesure des résistances faibles, sont ainsi en série, non pas avec celles-ci, ce qui constituerait une cause d'erreur considérable,

mais avec les bobines du galvanomètre qui doivent avoir une résistance suffisante pour que l'erreur due aux contacts soit négligeable. Il est nécessaire que les points de raccordement au galvanomètre soient compris entre les points d'attache des résistances étudiées au circuit principal.

3° Lorsqu'on doit comparer des résistances très différentes, on peut shunter le circuit du galvanomètre relié à la résistance la plus faible et admettre dans l'autre circuit un nombre d'éléments n fois plus grand que celui utilisé dans la branche voisine, fig. 112.

En appelant m le pouvoir multiplicateur du shunt, on a, sous les réserves formulées à l'occasion de la méthode par comparaisons successives,

$$x = mnr.$$

4° Si le galvanomètre n'est pas exactement différentiel, on adopte une méthode semblable à la double pesée : on substitue à x une résistance qui ramène l'équilibre de l'aiguille et qui lui est par conséquent égale.

Un autre artifice consiste à intervertir x et r et à faire varier r jusqu'à ce que le galvanomètre donne la même lecture avec les deux dispositions ; c'est alors que $x = r$.

Enfin, on peut se servir d'un galvanomètre dont les deux branches ont des constantes inégales en déterminant, au préalable, le rapport de ces constantes galvanométriques.

Pont de Wheatstone. Principe de la méthode. Positions du galvanomètre et de la pile. Valeurs les plus favorables à donner aux résistances du pont. — La méthode du pont de Wheatstone est la plus employée, parce qu'elle permet de mesurer avec une grande approximation des résistances comprises entre des limites écartées.

Sur deux conducteurs ABC, ADC, fig. 113, on dérive une branche ou *pont* BD et l'on réunit les points A et C par une branche AC.

On constitue ainsi un réseau de conducteurs qui a reçu le nom de pont de Wheatstone, dans lequel chaque côté est adjacent à 4 autres. Les côtés non-adjacents sont dits *conjugués*.

Désignons par $r_1, r_2, \ldots r_6$ les résistances des 6 branches ; par $e_1, e_2, \ldots e_6$, les forces électromotrices interposées dans celles ci

et par $i_1, i_2, \ldots . i_6$, les courants correspondants. D'après les lois de Kirchhoff, on a

$$i_5 = i_1 + i_2,$$
$$i_5 = i_3 + i_4,$$
$$i_1 r_1 + i_3 r_3 + i_5 r_5 = e_1 + e_3 + e_5,$$
$$i_2 r_2 + i_4 r_4 + i_5 r_5 = e_2 + e_4 + e_5,$$

en admettant que les signes des forces électromotrices soient contenus implicitement dans les expressions e.

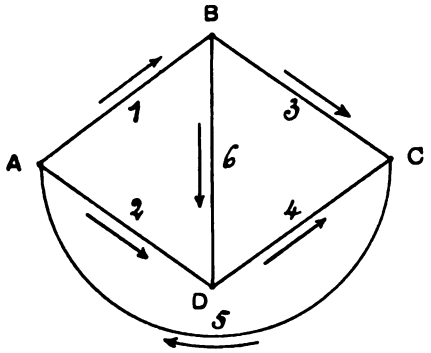


Fig. 113.

Une variation élémentaire de la résistance ou de la force électromotrice de la branche 6 produit des variations d'intensité dans les courants qui traversent les autres branches. Ces variations sont liées par les relations

$$di_5 = di_1 + di_2,$$
$$di_5 = di_3 + di_4,$$
$$r_1 di_1 + r_3 di_3 + r_5 di_5 = o,$$
$$r_2 di_2 + r_4 di_4 + r_5 di_5 = o.$$

Pour que les modifications apportées à la branche 6 n'amènent aucun changement dans 5, c'est à dire pour que di_5 soit nul, il faut que

$$di_2 = - di_1,$$
$$di_4 = - di_3,$$
$$r_1 di_1 = - r_3 di_3$$
$$r_2 di_2 = - r_4 di_4;$$

d'où

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$$

ou

$$r_1 r_4 = r_2 r_3.$$

Il suit de là que, pour qu'une variation de résistance ou de force électromotrice d'une branche quelconque du réseau n'affecte pas le courant de la branche conjuguée, il faut que les produits des résistances des deux autres couples de branches conjuguées soient égaux.

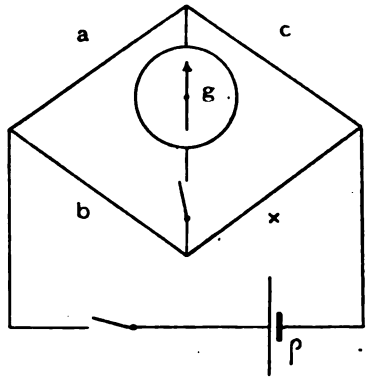


Fig. 114.

Cette propriété curieuse a été appliquée par Wheatstone de la manière suivante. Les branches a, b, c sont constituées par des caisses de résistance ; la branche x est occupée par le conducteur dont la résistance est inconnue. Un galvanomètre est inséré dans le cinquième côté du pont, tandis qu'une pile de force électromotrice e et de résistance ρ en occupe le sixième côté.

La forme schématique de la figure par laquelle on représente ordinairement cette disposition lui a fait donner le nom de parallélogramme de Wheatstone, dont les 4 *côtés* sont reliés par la *diagonale* de la pile et par celle du galvanomètre.

Le courant dans la branche du galvanomètre est donné par l'expression suivante, déduite des lois de Kirchhoff,

$$i = e \frac{bc - ax}{(a+b+c+x)\left\{\frac{(a+c)(b+x)}{a+b+c+x} + g\right\}\left\{\frac{(a+b)(c+x)}{a+b+c+x} + \rho\right\}} \quad (1)$$

$$= \frac{bc - ax}{M}.$$

On remarquera que le premier terme fractionnaire $\frac{(a+c)(b+x)}{a+b+c+x}$ du dénominateur M représente la résistance combinée des quatre branches a, b, c, x reliées à la pile ρ. Le second terme fractionnaire est la résistance combinée des mêmes branches considérées par rapport à g. Quand la relation $bc = ax$ est satisfaite, le courant s'annule dans le galvanomètre ; on a alors

$$x = \frac{b}{a} c.$$

Cette expression montre que les résistances des branches conjuguées b et c, a et x, ne peuvent être ni les deux plus grandes ni les deux plus petites ; les résistances les plus faibles sont donc adjacentes.

Or, il est possible de permuter le galvanomètre et la pile et l'on doit se demander quelle est, pour des résistances a, b, c, x données, la combinaison la plus avantageuse. Les résistances les plus faibles servent de shunt soit au galvanomètre, ce qui est le cas si a et b sont les résistances susdites, soit à la pile. Il est naturel de shunter ainsi celui de ces deux appareils dont la résistance est la plus petite, pour que l'atténuation de sensibilité produite par le shunt soit minima.

On peut se convaincre qu'il doit en être ainsi, en déterminant l'intensité i' du courant dans le galvanomètre, supposé permuté avec la pile, et en prenant la différence entre i et i'. On verrait que cette différence est positive lorsque, dans la première disposition, la diagonale dont la résistance est la plus forte réunit le point de jonction des côtés adjacents les plus résistants au point de jonction des côtés les moins résistants.

En pratique, la résistance du galvanomètre est presque toujours supérieure à celle de la pile. Il convient donc de ne jamais shunter le galvanomètre par les résistances les plus faibles.

Valeurs les plus favorables à donner aux résistances du pont. La relation $bc - ax = o$ peut être satisfaite par une infinité de valeurs de b, c et a. On doit se demander quelles sont les valeurs particulières de ces résistances qui, pour une légère altération de l'une d'elles, c, produisent la plus grande variation du courant

dans le galvanomètre. Une variation dc détermine une variation di exprimée par l'équation suivante déduite de (1) et dans laquelle on a éliminé c en supposant $c = \frac{ax}{b}$

$$di = e \frac{b^2 \, dc}{[g(a+b) + a(b+x)][p(b+x) + x(a+b)]} = \frac{eb^2 \, dc}{M} \qquad (2)$$

Si l'on recherche les valeurs de a et de b qui rendent maxima la valeur de di, on trouve (1)

$$a = \sqrt{\rho g}$$

$$b = \sqrt{gx \frac{\rho + x}{g + x}}.$$

En introduisant ces valeurs dans l'équation (2) et en considérant le plus petit courant $di = \frac{d\alpha}{k}$ appréciable au galvanomètre, on trouve la valeur de l'écart limite dc qui ne produit plus aucun effet sur l'appareil et, partant, l'erreur absolue qu'on peut commettre sur la résistance cherchée dans le cas où l'on emploie des résistances à curseur et où l'équilibre du galvanomètre peut être obtenu.

On obtient l'expression

$$dx = \frac{d\alpha}{k} \frac{M}{e a b},$$

dans laquelle il suffit de remplacer a et b par les valeurs trouvées plus haut.

En outre, on sait que la puissance fournie par la pile est maxima lorsque la résistance de celle-ci est égale à la résistance extérieure

$$\rho = \frac{(a + c)(b + x)}{a + b + c + x}$$

et que la sensibilité du galvanomètre est maxima dans des conditions analogues :

$$g = \frac{(a + b)(c + x)}{a + b + c + x}.$$

---

(1) HEAVISIDE. *Phil. Mag.*, 1873. — VASCHY. *Traité d'Électricité et de Magnétisme*, t. II, p. 319.

En tenant compte de ces remarques, on trouve que la relation correspondant au maximum de sensibilité se réduit à

$$a = b = c = x = g = \rho.$$

Cette condition est presque toujours irréalisable, attendu que le galvanomètre et la pile sont donnés dans la plupart des cas.

L'erreur relative

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\alpha}{k} \frac{M}{eabx}$$

devient alors

$$\frac{d\alpha \times 16\, x^4}{k\, e\, x^3}.$$

Pour une erreur possible d'une division avec un galvanomètre dont la constante est 40×10^6, on a, si $x = 10$ et $e = 1$,

$$\frac{dx}{x} = \frac{16 \times 10^4}{40 \times 10^9} = \frac{4}{1\,000\,000}.$$

L'erreur d'étalonnage des bobines du pont est généralement très supérieure à cette erreur due à la lecture des indications du galvanomètre.

Pont à bobines. — Sous sa forme usuelle, le pont de Wheatstone comprend 3 séries de résistances groupées dans une même boîte.

Fig. 115.

Les branches *a* et *b*, appelées *branches de proportion*, sont composées chacune de trois bobines ayant respectivement des résis-

tances de 10, 100 et 1000 ohms. La *branche de comparaison c* comprend les bobines nécessaires pour former toutes les résistances entières comprises entre 1 et 10 000 ohms environs. Le quatrième côté est constitué par la résistance inconnue. L'appareil comporte, en outre, deux clefs qui permettent de fermer la branche de la pile et celle du galvanomètre au moment de la mesure. Il faut avoir soin d'abaisser la clef de la pile avant celle du galvanomètre et de relever celle-ci la première, pour éviter les effets d'extra-courant dans le galvanomètre. Ces clefs ne sont abaissées que le temps nécessaire pour les lectures, afin que les résistances ne s'échauffent pas sous l'action du courant.

Lorsque l'équilibre est obtenu, on a

$$x = \frac{b}{a} c.$$

Le rapport $\frac{b}{a}$ peut recevoir les valeurs 100, 10, 1, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$. Comme, d'autre part, c est réglable de 1 à 10 000 ohms, il est possible de mesurer les résistances comprises entre $\frac{1}{100}$ et 1 000 000 ohms. Dans quelques modèles du pont à bobines, on trouve des résistances égales à 1 ohm dans les branches de proportion; on peut alors adopter les rapports 1 000 et $\frac{1}{1000}$ entre les résistances de ces branches.

Une mesure préalable ayant fait connaître la valeur approximative de la résistance inconnue, on choisit les valeurs de a et b les plus voisines possible de celles qui donnent le maximum de sensibilité et l'on relie au galvanomètre, dont la résistance depasse ordinairement celle de la pile, le point de jonction des résistances les plus grandes et celui des résistances les plus faibles. Il va sans dire que si la résistance inconnue est très grande ou très petite, on n'a pas le choix des valeurs à adopter pour les branches de proportion.

On détermine les résistances c et $c + 1$ donnant des écarts α et α' des deux côtés de la position de repos du galvanomètre; on a, en interpolant,

$$x = \frac{b}{a}\left(c + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}\right).$$

Pour déterminer l'erreur due à l'inexactitude des lectures, il suffit de différentier cette expression en supposant que les erreurs de lecture $d\alpha$ et $d\alpha'$ sont égales et s'ajoutent. Il vient :

$$dx = \frac{b}{a}\,\frac{d\alpha}{\alpha+\alpha'},$$

d'où

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\alpha}{\left(c+\frac{\alpha}{\alpha+\alpha}\right)\left(\alpha+\alpha'\right)}.$$

C'est là la valeur de l'erreur relative dans le cas où l'on ne peut obtenir le retour au zéro du galvanomètre; cette erreur est d'autant plus faible que la résistance débouchée dans la branche de comparaison est plus élevée et les déviations plus grandes. Pour augmenter c, il faut choisir le rapport $\frac{b}{a}$ aussi faible que possible, ce que montre d'ailleurs l'expression de l'erreur absolue dx. En supposant $\alpha+\alpha'=100$ et $c=100$, on peut, lorsque l'erreur de lecture atteint une division, commettre de ce chef une erreur relative de 0,0001. A cette erreur viennent s'ajouter les erreurs dues à l'imperfection de la graduation des bobines et à la résistance des contacts des fiches et des connexions reliant la résistance inconnue au pont, erreurs qui sont voisines du 0,001 dans les boîtes ordinaires.

Pont à fil divisé. Méthode de MM. de Nerville et Benoît. — Le pont à fil divisé est particulièrement employé pour la gra-

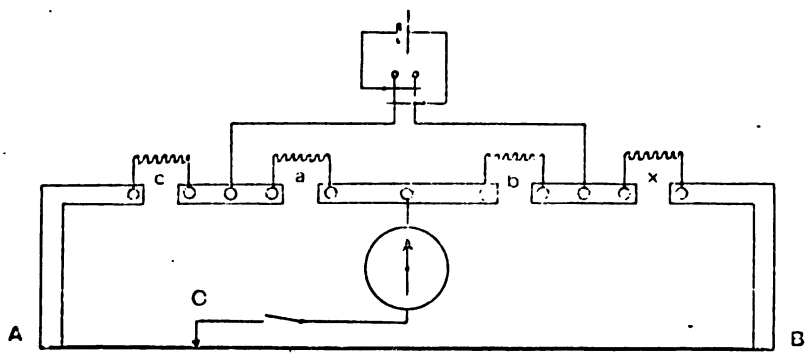


Fig. 116.

duation de résistances par comparaison avec des résistances étalons de même grandeur. Soit A B un fil en maillechort ou en platine iridié, de longueur l, calibré et tendu entre les extrémités d'une série de blocs en cuivre auxquels il est soudé. Le long du fil glisse un curseur dont la position est repérée sur une échelle divisée parallèle au fil. Un vernier indique la position exacte du contact mobile, à un vingtième de millimètre près.

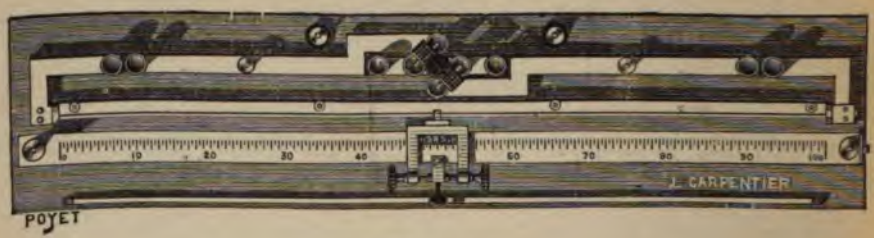


Fig. 117.

Après avoir réglé la bobine à étalonner x aussi exactement que possible, à l'aide du pont ordinaire à bobines, on l'insère entre deux des blocs de cuivre. Les branches a, b et c sont constituées par des résistances égales entre elles et aussi voisines que possible de la résistance à l'essai. Ce sont là les conditions de sensibilité les plus favorables si la résistance du galvanomètre et celle de la pile sont du même ordre. Les résistances sont reliées aux blocs de cuivre de résistance négligeable par des godets à mercure que portent ces blocs.

Appelons r la résistance du fil correspondant à une division de l'échelle et soit l, la longueur A C qui détermine l'équilibre de l'aiguille du galvanomètre. On a la relation

$$\frac{a}{b} = \frac{c + r\,l_1}{x + r\,(l - l_1)}.$$

On substitue à x la résistance étalon R et l'on trouve une nouvelle longueur l_2 pour laquelle

$$\frac{a}{b} = \frac{c + r\,l_2}{\mathrm{R} + r\,(l - l_2)}.$$

De là on tire

$$\frac{a}{b} = \frac{r\,(l_1 - l_2)}{(x - \mathrm{R}) - r\,(l_1 - l_2)}.$$

On élimine le rapport $\frac{a}{b}$ en intervertissant les branches de proportion et en répétant les deux observations. On obtient

$$\frac{b}{a} = \frac{r\,(l'_1 - l'_2)}{(x - \mathrm{R}) - r\,(l'_1 - l'_2)},$$

d'où

$$x - \mathrm{R} = r\,(l_1 - l_2 + l'_1 - l'_2).$$

La différence entre les résistances comparées est ainsi obtenue en fonction de la résistance du fil. Si l'étalonnage au pont ordinaire a été fait au 0,001, la différence représente tout au plus $\frac{\mathrm{R}}{1\,000}$. Cette différence étant à son tour estimée au 0,01, la valeur peut être considérée comme exacte à 0,00001 près.

Calibrage d'un fil. — Le calibrage du fil du pont peut se faire de la manière suivante. On a soin de choisir un fil de section aussi uniforme que possible, qu'on vérifie à l'aide d'une bonne jauge. On y fait passer un courant assez faible pour ne pas l'échauffer sensiblement et l'on appuie sur le fil deux cavaliers portés par une entretoise isolante et présentant des lignes de contact bien nettes. On relie ces cavaliers à un galvanomètre très sensible et l'on observe si la déviation de celui-ci reste constante pour diverses positions successives occupées par les cavaliers sur le fil. Si la déviation varie, on use le fil aux endroits où les tronçons ont une résistance trop faible, à moins qu'on ne préfère employer une table de correction. Il ne reste qu'à déterminer la résistance totale du fil pour déduire la valeur r d'une des divisions.

Pont de Lord Kelvin. — Les dispositions de pont précédentes ne permettent pas de mesurer exactement des résistances très faibles, parce que la résistance des contacts s'ajoute à celle du conducteur essayé ; on court ainsi le risque d'introduire une erreur notable dans le résultat. Pour l'évaluation des résistances faibles,

il faut employer des méthodes permettant d'éliminer l'influence des contacts; telle est la méthode de Lord Kelvin. S'il s'agit de mesurer la résistance d'un bout de barre métallique, on appuie celle-ci, désignée par la lettre M dans la fig. 118, sur des couteaux *h k*, *l i*, séparés l'un de l'autre par une distance connue. La résistance

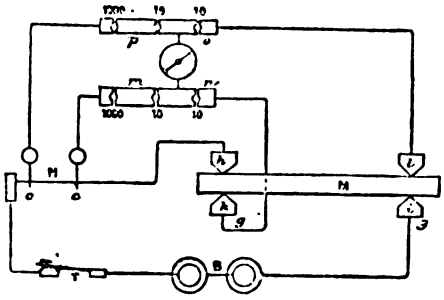


Fig. 118.

de comparaison est constituée par un gros fil de maillechort N disposé parallèlement à une règle graduée et sur lequel glissent des curseurs *c*, *c*. Le fil étalon et la barre à essayer sont intercalés dans le circuit d'une pile primaire ou secondaire B, pouvant débiter un courant de 5 à 15 ampères. En dérivation sur ce circuit, on dispose quatre résistances *p*, *o*, *m*, *n* et un galvanomètre sensible formant un pont entre celles-ci.

Les résistances *p*, *o*, *m*, *n* étant choisies de manière à satisfaire à la condition

$$\frac{m}{n} = \frac{p}{o} \qquad (1),$$

on déplace les curseurs *c*, *c* jusqu'à ce que le galvanomètre n'accuse plus de courant.

Dans ces conditions, la résistance *r* du segment de fil compris entre les curseurs est à la résistance *x* de la portion de barre limitée par les couteaux dans le rapport $\frac{m}{n}$.

En effet, en appelant V_p, V_m, V_n, V_o, les potentiels respectifs des points *c*, *c*, *k*, *l*; V, le potentiel aux deux bornes du galvanomètre;

I, l'intensité du courant dans les conducteurs N, M; i_1, i_2, les intensités dans les dérivations *cpol*, *cmnk;* on a les relations

$$I = \frac{I}{r}(V_p - V_m) = \frac{I}{x}(V_n - V_o), \qquad (2)$$

$$i_1 = \frac{I}{p}(V_p - V) = \frac{I}{o}(V - V_o), \qquad (3)$$

$$i_2 = \frac{I}{m}(V_m - V) = \frac{I}{n}(V - V_n). \qquad (4)$$

En combinant ces équations avec (1), on en déduit

$$\frac{r}{x} = \frac{m}{n} = \frac{p}{o}.$$

Les résistances de contact sont négligeables devant les résistances m, n, p, o, auxquelles elles s'ajoutent.

Chapitre XIV.

MESURE DES CAPACITÉS.

Méthode indirecte par la perte de charge. — Cette méthode est analogue à celle employée pour la mesure des grandes résis-

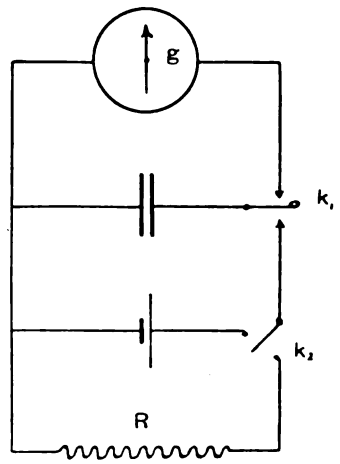


Fig. 119.

tances et peut être utilisée lorsqu'on ne dispose pas d'un condensateur étalon. On charge le condensateur étudié à l'aide d'une pile *e* en manœuvrant la clef de charge *k* et la clef à deux direc-

tions k_2. On relève la déviation que la différence de potentiel V_0 des armatures détermine dans un électromètre ou bien l'élongation accusée par un galvanomètre balistique g dans lequel on décharge le condensateur. Dans ce dernier cas, on recharge celui-ci aussitôt après la première mesure.

On laisse ensuite le condensateur se décharger dans une grande résistance connue R. Au bout d'un temps t, on estime la différence de potentiel des armatures V_t par le procédé déjà employé. On sait que

$$c = \frac{t}{R \log_e \frac{V_0}{V_t}} = \frac{t}{2{,}3\ R\ \mathrm{Log}\ \frac{V_0}{V_t}},$$

si la résistance d'isolement du condensateur est considérable par rapport à R.

La discussion de la formule conduit aux mêmes résultats que dans le cas de la mesure d'une grande résistance.

Une remarque générale s'applique à toutes les méthodes de mesure des capacités : il faut veiller soigneusement à l'isolement de toutes les parties des circuits, car une négligence sous ce rapport peut amener la décharge partielle ou totale des armatures et, partant, introduire des erreurs grossières dans les résultats.

Méthode indirecte de Jenkin. — On charge le condensateur au moyen d'une pile de force électromotrice e, puis on le décharge dans un galvanomètre. On a

$$c = \frac{q}{e} = \frac{\alpha}{e\,K},$$

K étant la constante balistique. On relève ensuite la déviation δ occasionnée par le courant que le même couple produit dans un circuit de résistance R. En désignant par k la constante permanente du galvanomètre

$$\frac{\delta}{k} = \frac{e}{R}.$$

On tire delà

$$c = \frac{\alpha}{\delta R}\frac{k}{K} = \frac{\alpha}{\delta R}\frac{T_0}{\pi}.$$

L'erreur qui peut entacher c est la somme des erreurs commises sur α, δ et T_0.

Il faut que la période d'oscillation du galvanomètre soit grande par rapport à la durée de la décharge du condensateur. Pour s'en assurer, on ajoute dans le circuit du galvanomètre une résistance égale à celle de ce dernier. Si, en répétant la mesure, l'élongation balistique ne varie pas, c'est que la condition est satisfaite.

Méthode directe par comparaison. — La méthode par comparaison, dans laquelle on utilise un condensateur étalon, est la plus communément employée.

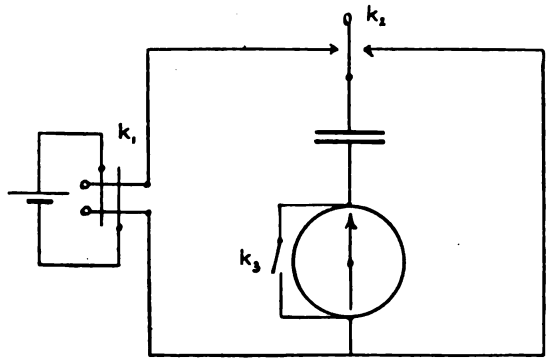


Fig. 120.

Le condensateur étudié est chargé à l'aide d'une pile par l'intermédiaire d'une clef d'inversion k_1 et d'une clef de charge k_2. On lit l'élongation provoquée par le courant de charge dans un galvanomètre. En manœuvrant la clef k_2, on note ensuite l'élongation produite par la décharge. Si les armatures du condensateur sont parfaitement isolées, les deux élongations sont égales; sinon, le courant de perte accroît la première élongation et diminue la seconde: on prend, dans ce cas, l'élongation moyenne. K_3 est une clef de court-circuit destinée à arrêter les oscillations du galvanomètre, si celui-ci est un appareil du type Deprez et d'Arsonval. On répète les mêmes mesures avec le condensateur étalon. En appelant c et c' les capacités, α et α' les élongations, on a

$$\frac{c}{c'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

De là, on tire

$$\frac{dc}{c} = \frac{\alpha' + \alpha}{\alpha\alpha'}\, d\alpha = \frac{1 + \frac{\alpha}{\alpha'}}{\alpha}\, d\alpha,$$

en supposant que les erreurs de lecture s'ajoutent. Il est facile de voir que l'erreur due aux lectures est la plus faible quand la déviation α est la plus grande possible et la déviation α' voisine de α. Au besoin, on peut employer un condensateur étalon gradué, pour égaliser autant que possible les déviations, ou utiliser pour les deux expériences des piles différentes, dont les forces électromotrices sont dans un rapport connu, ou encore adopter des shunts de galvanomètre inégaux en déterminant au préalable le facteur de correction.

Les condensateurs isolés au moyen de diélectriques impurs prennent une charge résiduelle qui prolonge la durée de la charge et de la décharge et entache d'erreur les résultats fournis par la méthode précédente. La capacité propre du diélectrique correspond alors à la quantité d'électricité qui s'écoule au premier instant de la décharge (1). Soit q la *charge disponible* ainsi définie et e la différence de potentiel des armatures, on a

$$c = \frac{q}{e}.$$

Pour mesurer cette charge disponible, on remplace le levier de la clef de charge ordinaire par l'une des branches d'un diapason dont les vibrations sont entretenues par un trembleur électrique. Le galvanomètre est disposé dans la branche traversée par le courant de décharge seulement. En appelant n le nombre de décharges effectuées par seconde, on obtient une déviation α due au courant moyen et l'on pose

$$i = \frac{q}{t} = nce = \frac{\alpha}{k},$$

k étant la constante permanente du galvanomètre. Pour que l'emploi de cette méthode soit justifié, il faut que, pendant la durée

---

(1) Eric Gerard. *Leçons sur l'Electricité*, 4e édition, § 96.

du contact produit par le diapason, le condensateur ait pris sa charge normale. Pour s'en assurer, il convient de faire varier la période de vibration du diapason par des poids pouvant glisser le long de ses branches et de rechercher si un déplacement des poids n'occasionne pas de modification sensible dans le résultat.

Cette variante de la méthode de comparaison n'est pas employée dans les laboratoires industriels pour les câbles dont les diélectriques ont une forte charge résiduelle, car il y a intérêt à connaître cette charge. C'est pourquoi, dans ce cas, on mesure la décharge après une durée d'électrisation de 1 minute environ.

Méthode de Faraday. — On commence par charger le condensateur c et le décharger à travers le galvanomètre. On observe une élongation α telle que

$$\frac{\alpha}{K} = ce.$$

Après l'avoir rechargé, on réunit les deux condensateurs c et c' par la clef k_1, la clef k_2 étant ouverte; puis on décharge dans le

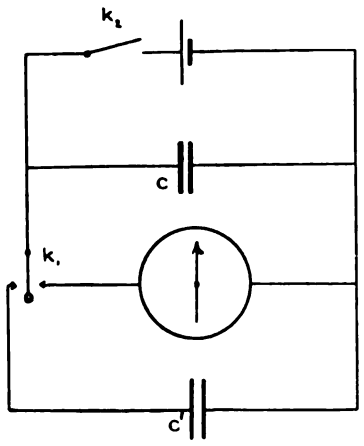


Fig. 121.

galvanomètre la quantité d'électricité qui est restée dans le condensateur c.

En appelant e' la différence de potentiel commune des armatures des deux condensateurs après la réunion, on a

$$e'(c+c') = ec$$

d'où

$$\frac{\alpha'}{K} = ce' = c\,\frac{ce}{c+c'}.$$

Il résulte de là que

$$\frac{c}{c'} = \frac{\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

On a vu, dans l'Introduction, que, pour une expression de cette forme, l'erreur relative limite est minima pour $\alpha = 2{,}4\,\alpha'$.

L'erreur n'est pas sensiblement plus grande si l'on adopte le rapport $\frac{\alpha}{\alpha'} = 2$, qui conduit à

$$\frac{dc}{c} = 6\,\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Méthode par réduction à zéro de M. de Sauty. — On adopte un dispositif analogue à celui du pont de Wheatstone, comportant

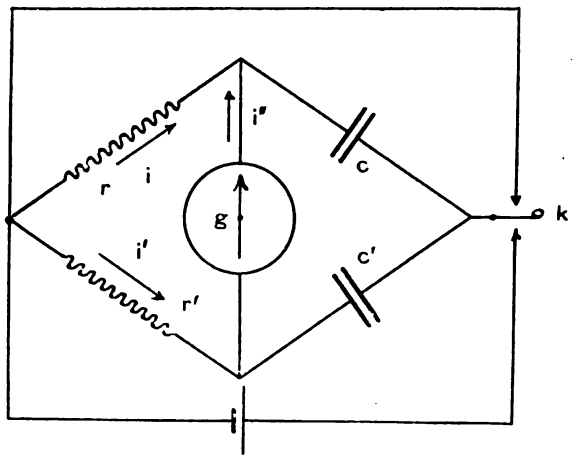


Fig. 122.

deux résistances réglables sans self-induction, r et r', les deux condensateurs à comparer c et c' et un galvanomètre balistique g; une pile est réunie au pont par une clef de charge et de décharge k.

On règle les résistances r et r' jusqu'à ce que, lors de l'abaissement et du relèvement de la clef, le galvanomètre ne dévie plus. On a alors

$$\frac{c}{c'} = \frac{r'}{r}.$$

Pour établir la relation précédente, appelons i, i' et i'' les courants qui, à un instant donné de la décharge des condensateurs, traversent les branches r, r' et g lorsque l'équilibre n'est pas encore atteint.

En appliquant la seconde loi de Kirchhoff au circuit formé par ces trois branches et en représentant par $\mathfrak{L}$ le coefficient de self-induction du galvanomètre, on a

$$ir - i'' g - i' r' = - \mathfrak{L} \frac{di''}{dt}.$$

En multipliant les deux membres de l'équation par dt et en intégrant le premier membre entre les limites o et τ de la durée de la décharge et le second membre entre les valeurs nulles que présente le courant i'' au commencement et à la fin de celle-ci, il vient

$$qr - q''g - q' r' = o.$$

Si l'élongation est nulle, $q'' = o$, d'où

$$qr = q' r',$$

ou

$$c e r = c' e r'.$$

On déduit de là la relation posée.

Pour déterminer l'erreur limite que comporte la méthode, remarquons que

$$q''g = \frac{\alpha}{k} g = q r - q' r' = e (cr - c' r').$$

A une erreur de lecture $d\alpha$ correspond une erreur dc telle que

$$\frac{d\alpha}{k} g = e r \, dc.$$

De là, on tire

$$\frac{dc}{c} = \frac{g}{k e r \times \frac{r'}{r} c'} d\alpha = \frac{g \, d\alpha}{k e r' c'}.$$

Pour réduire l'erreur relative limite, il convient donc de choisir e et r' aussi grands que possible. Il résulte de là que r sera grand aussi, puisque r et r' sont dans le même rapport que c' et c. Il est toutefois inutile de prendre pour r et r' des valeurs plus grandes que celles pour lesquelles une variation d'un ohm dans l'une des branches ne produit pas d'élongation sensible au galvanomètre.

Méthode de M. Gott. — La méthode précédente est sujette à plusieurs causes d'erreur, provenant de ce que la self-induction et la capacité des bobines formant les résistances r et r' ne sont géné-

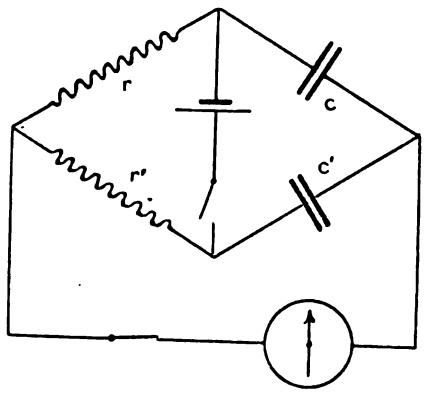


Fig. 123.

ralement pas négligeables et de ce que les condensateurs peuvent donner lieu à des courants de perte entre les armatures. Ce dernier inconvénient se présente toujours lorsqu'on mesure la capacité d'un câble électrique.

Dans ce cas, une autre cause d'erreur importante intervient : la durée de la charge d'un câble est beaucoup plus grande que celle des condensateurs étalons. Il s'ensuit que si même $qr = q'r'$, les potentiels aux bornes du galvanomètre n'ont pas à chaque instant la même valeur. Le condensateur étalon se chargeant rapidement, le galvanomètre sera traversé, pendant les premiers moments, par un courant dirigé vers ce condensateur; ensuite le courant se portera vers le câble.

M. Gott a cherché à résoudre ces difficultés en intervertissant, dans la méthode de M. de Sauty, la pile et le galvanomètre, fig. 123. On

abaisse d'abord la clef de la pile de manière à laisser le régime permanent s'établir dans les résistances et les condensateurs, puis on abaisse la clef du galvanomètre, afin de vérifier si le potentiel du point de jonction des résistances est égal au potentiel du point de jonction des condensateurs, auquel cas on a

$$\frac{r}{r'} = \frac{c'}{c}.$$

Les meilleures conditions d'expérience sont les mêmes que dans la méthode de M. de Sauty.

On évite, par ce procédé, les effets sur le galvanomètre de la self-induction des bobines r et r' et de la durée de charge du câble; mais le galvanomètre est toutefois traversé par le courant de perte du câble.

Méthode de Lord Kelvin. — Pour supprimer ce dernier incon-

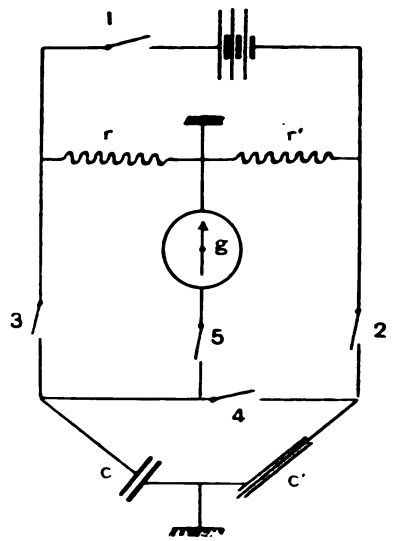


Fig. 124.

vénient, Lord Kelvin a adopté la méthode suivante, qui est en usage pour déterminer la capacité des longs câbles.

On charge le câble c' et le condensateur étalon c en abaissant les

clefs 1, 2 et 3. En appelant i le courant qui traverse les résistances r et r', les condensateurs c et c' prennent des charges

$$q = c\,i\,r,$$
$$q' = c'\,ir'.$$

On relève ensuite les clefs 2, 3 et 1 et l'on abaisse 4 de manière à permettre aux condensateurs de se décharger l'un dans l'autre; puis on ferme la clef 5, afin d'écouler le résidu de la charge des condensateurs dans le galvanomètre. En réglant r et r' de telle sorte que ce résidu soit nul, on a

$$c\,r = c'\,r'.$$

Comme dans les méthodes précédentes, on choisit r et r' assez grands pour qu'une différence de 1 ohm dans la valeur de l'une de ces résistances ne cause pas d'élongation appréciable du galvanomètre.

Chapitre XV.

MESURE DES PUISSANCES ÉLECTRIQUES.

Cas d'un courant continu. Wattmètre. — La puissance électrique absorbée dans un conducteur soumis à une différence de potentiel *e*

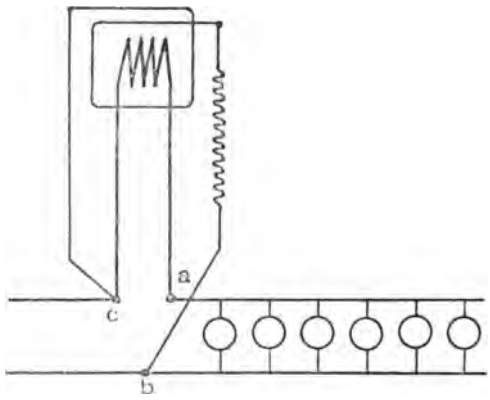


Fig. 125.

et parcouru par un courant *i*, a pour expression *ei*, s'il s'agit d'un courant continu et constant.

Ce produit peut être déterminé par voie indirecte, en mesurant séparément les facteurs *e* et *i* à l'aide d'une des méthodes indiquées

précédemment ou par voie directe, au moyen d'appareils appelés wattmètres.

Les wattmètres les plus employés ont la forme de l'électrodynamomètre de Siemens. La bobine fixe, composée d'un petit nombre de tours de gros fil, est disposée en série avec le circuit dans lequel est absorbée la puissance à mesurer. La bobine mobile, ordinairement composée de quelques tours de fil plus fin, est mise en tension avec une grande résistance et le tout est raccordé en dérivation par rapport aux points qui limitent le circuit étudié, fig. 125. Appelons r la résistance de la bobine fixe, R la résistance de la bobine mobile et du rhéostat additionnel, e la différence de potentiel des points a b et i l'intensité du courant qui passe au point a. Le couple électrodynamique qui sollicite la bobine mobile peut être représenté par

$$A\, i \times \frac{e + r\, i}{R}.$$

Il est mesuré par une torsion θ. Si r est suffisamment petit, on peut négliger $r\, i$ devant e et il vient

$$\theta = \frac{ei}{K}.$$

Pour faciliter les lectures, il est bon d'adjoindre un amortisseur au wattmètre. Dans un modèle de MM. Siemens et Halske, cet amortisseur est constitué par des palettes baignant dans des godets à glycérine.

Lorsque les expériences sont faites très près de dynamos ou de conducteurs parcourus par des courants et qu'on craint l'influence de ceux-ci, on peut, pour supprimer les perturbations, dédoubler les deux bobines de manière à faire une sorte de système mobile astatique.

Les connexions telles qu'elles sont indiquées dans le croquis amènent, comme on le voit, une légère erreur en trop dans les indications du wattmètre, puisque le voltage aux bornes du circuit dérivé est accru de la chute de tension dans la bobine fixe de l'appareil. Si l'on raccordait le circuit mobile du wattmètre directement à la résistance utile, on commettrait encore une erreur positive, car la bobine fixe serait alors traversée par le courant

utile augmenté du courant dérivé. Le wattmètre fonctionnerait dans ce cas, même si le circuit utile était interrompu, car les deux bobines de l'appareil seraient traversées par un courant.

On détermine la constante K de l'appareil en reliant celui-ci à une résistance connue, traversée par un courant d'intensité déterminée.

On pourra toujours estimer l'erreur relative commise en négligeant ri; elle a pour expression

$$\frac{i^2 r}{ei} = \frac{ir}{e}.$$

Cas d'un courant périodique. — Lorsque la puissance électrique est transportée sous forme de courants périodiques, le choix d'une méthode de mesure exige une attention toute particulière.

Il y a alors deux cas à considérer :

1° Le conducteur qui absorbe la puissance à mesurer a une réactance négligeable. Il en est ainsi avec les lampes à incandescence.

2° La réactance du conducteur n'est pas négligeable.

Conducteurs sans réactance. — Lorsqu'un conducteur de la première catégorie est soumis à une différence de potentiel périodique, il est le siége d'un courant dont les phases coïncident avec celles de la différence de potentiel. Par suite, si la loi qui régit le courant peut être exprimée par une fonction sinusoïdale simple, la puissance moyenne est égale au produit de la différence de potentiel efficace par le courant efficace.

On peut déterminer séparément l'intensité efficace du courant à l'aide d'un électrodynamomètre et la différence de potentiel efficace soit par l'électromètre, soit par un voltmètre ayant une réactance négligeable, le voltmètre Cardew, par exemple.

Dans l'hypothèse où la puissance considérée est transformée intégralement en chaleur par l'effet Joule, on peut déduire cette quantité de chaleur de l'intensité ou de la différence de potentiel mesurées respectivement par l'indication d'un électrodynamomètre

ou celle d'un voltmètre Cardew. On a, en appelant ρ la résistance, supposée connue, du conducteur sur lequel on expérimente

$$\frac{1}{T}\int_0^T eidt = \rho\,\frac{1}{T}\int_0^T i^2dt = \frac{1}{\rho}\frac{1}{T}\int_0^T e^2dt.$$

La méthode la mieux adaptée aux mesures industrielles est celle du wattmètre, qui est indépendante de la loi du courant. Il faut employer un appareil dans lequel la réactance de la bobine mobile et de la résistance additionnelle est négligeable. On arrive à ce résultat en composant la résistance additionnelle de bobines à double enroulement ou de lampes à incandescence ou encore en utilisant une résistance liquide sans capacité de polarisation sensible.

Le courant qui traverse le circuit dérivé du wattmètre est alors en concordance de phases avec la différence de potentiel, et l'angle de torsion de l'appareil est directement proportionnel à la puissance moyenne

$$\theta = \frac{1}{K}\frac{1}{T}\int_0^T eidt.$$

La constante K est déterminée au moyen d'une résistance traversée par un courant continu.

Mais souvent la réactance de la branche dérivée n'est pas négligeable, lorsque la résistance additionnelle est formée par des bobines. Il en résulte un affaiblissement du courant dans cette branche et un décalage de sa phase sur celle de la différence de potentiel, qui ont pour effet de réduire les indications du wattmètre en dessous de la valeur correspondant à la puissance réellement absorbée par le conducteur ρ.

On pourrait rendre correctes les indications du wattmètre en enroulant la bobine mise en série avec le cadre mobile de telle manière que sa capacité neutralise l'effet de la self-induction du circuit dérivé et qu'ainsi la réactance s'annule. Mais il est plus simple d'employer un électrodynamomètre ordinaire, en se servant en guise de résistance additionnelle de lampes à incandescence dont la réactance est presque nulle, et de faire passer dans le circuit

de l'enroulement mobile un courant assez intense pour permettre de réduire autant que possible le nombre de spires de cet enroulement.

Pour apprécier l'erreur due à la réactance du circuit de la bobine mobile, on remarquera, avec M. Meylan, que le courant dans ce circuit est

$$i_{eff} = \frac{E_{eff}}{R\sqrt{1 + tg^2 \varphi}} = \frac{E_{eff}}{R} \cos \varphi,$$

au lieu de

$$i_{eff} = \frac{E_{eff}}{R},$$

I_{eff} désignant l'intensité efficace du courant principal. Le couple électrodynamique moyen, au lieu d'être proportionnel à $I_{eff}\, i_{eff}$, est proportionnel à $I_{eff}\, i_{eff} \cos \varphi$, car on sait que le produit moyen de deux facteurs sinusoïdaux I et i déphasés d'un angle φ est

$$I_{eff}\, i_{eff} \cos \varphi = \frac{E_{eff}\, I_{eff}}{R} \cos^2 \varphi.$$

L'erreur relative est donc égale à

$$\varepsilon = \frac{\dfrac{E_{eff}\, I_{eff}}{R} \cos^2 \varphi - \dfrac{E_{eff}\, I_{eff}}{R}}{\dfrac{E_{eff}\, I_{eff}}{R}} = -\sin^2 \varphi.$$

Elle est essentiellement négative. Pour des angles faibles, on peut remplacer le sinus par la tangente et écrire

$$\varepsilon = -\operatorname{tang}^2 \varphi.$$

Exemple. Dans le cas où la réactance du circuit dérivé du wattmètre est exprimée par $\frac{2\pi}{T}\mathfrak{L}$, on a

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{2\pi}{T} \frac{\mathfrak{L}}{R}.$$

Alors, si

$$T = \frac{1}{125} \text{ de seconde},$$

$$R = 3000 \text{ ohms},$$

$$\mathfrak{L} = 0{,}383 \text{ henry},$$

$$\varepsilon = -0{,}01.$$

Conducteurs avec réactance. Emploi du wattmètre. — L'expression de la puissance est alors de la forme

$$p_m = E_{eff}\, I_{eff} \cos \Phi,$$

Φ représentant l'angle de phase dû à la réactance du conducteur. La bobine fixe du wattmètre possède trop peu de spires pour altérer sensiblement cet angle. Si, comme c'est généralement le cas, la capacité des circuits est faible vis-à-vis de l'influence de celle de la self-induction, il y a un retard de phase du courant sur la différence de potentiel agissante, à la fois dans le circuit principal comprenant l'enroulement fixe du wattmètre et dans le circuit dérivé. Il en résulte une tendance à la concordance des phases du courant dans les deux circuits, ce qui peut avoir pour effet de renforcer les indications de l'instrument au delà de la valeur correspondant à la puissance réelle, contrairement à ce qui se produit dans le cas d'un conducteur sans réactance.

Le courant qui passe dans la bobine mobile a pour intensité efficace $\frac{E_{eff}}{R}\cos\varphi$ et la réaction des deux bobines est proportionnelle à

$$\frac{E_{eff}\cos\varphi}{R} \times I_{eff} \times \cos(\Phi - \varphi).$$

Par suite, l'erreur relative est

$$\varepsilon' = \frac{E_{eff}\, I_{eff} \cos\varphi \cos(\Phi - \varphi) - E_{eff}\, I_{eff} \cos\Phi}{E_{eff}\, I_{eff} \cos\Phi}$$

$$= \cos^2\varphi + \cos\varphi \sin\varphi \operatorname{tang}\Phi - 1$$

$$= \cos\varphi \sin\varphi \operatorname{tang}\Phi - \sin^2\varphi.$$

Pour de petites valeurs de φ, on peut écrire

$$\varepsilon' = \operatorname{tang}\varphi \operatorname{tang}\Phi - \operatorname{tang}^2\varphi = \varepsilon + \operatorname{tang}\Phi\sqrt{-\varepsilon}.$$

Si Φ est positif, ce qui a lieu toutes les fois qu'il n'existe pas de capacité importante dans le circuit principal, l'erreur est négative tant que $\Phi < \varphi$, c'est-à-dire que les indications de l'appareil sont alors trop faibles. Mais, en général $\Phi > \varphi$ et l'erreur est positive.

Ainsi, avec $\varepsilon = -0{,}01$ et $\Phi = 60°$, valeur qu'atteint le retard de phase dans les transformateurs fonctionnant à vide, on a

$$\varepsilon' = 0{,}163.$$

De là, la nécessité de restreindre autant que possible l'angle de phase dans le circuit dérivé du wattmètre.

Pour cela, on peut utiliser un électrodynamomètre ordinaire en guise de wattmètre (1). La bobine mobile, parcourue par un courant intense et composée de très peu de spires, est en série avec une résistance sans réactance qui est mesurée par le rapport entre la différence de potentiel lue à l'aide d'un voltmètre pour courants alternatifs et le courant déterminé au moyen d'un électrodynamomètre.

M. Fleming a trouvé que, dans ces conditions, la puissance dépensée dans les conducteurs avec réactance peut être mesurée plus exactement que par les autres méthodes industrielles. Toutefois, le procédé ainsi modifié ne convient pas pour des mesures continues, car la dépense d'énergie dans l'appareil même est considérable.

Il faut avoir soin de ne pas abriter le wattmètre dans une boîte métallique et de ne pas faire entrer dans sa construction des pièces métalliques massives, car l'expérience a montré que des appareils semblables donnent lieu à des erreurs importantes dues aux courants de Foucault.

Méthode de MM. Ayrton et Sumpner. — Voici une méthode qui permet de déterminer exactement, à l'aide de 3 voltmètres et d'un ampèremètre pour courants alternatifs, la puissance consommée dans une résistance R à réactance. On dispose en série avec R une résistance sans réactance r, composée, par exemple, de lampes à incandescence. Soient v_1 la différence de potentiel instantanée aux bornes de R et v_2 la différence de potentiel aux extrémités de r au même instant. La chute de tension totale occasionnée par $R + r$ est, au moment considéré,

$$v = v_1 + v_2 \qquad (1).$$

---

(1) *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, t. XXI, 1893.

Si i est l'intensité correspondante du courant, la puissance à mesurer est, à l'instant considéré,

$$p = i\,v_1 = \frac{v_2}{r}\,v_1.$$

Mais on tire de (1)

$$v_1\,v_2 = \frac{1}{2}\left(v^2 - v_1^2 - v_2^2\right);$$

d'où

$$p = \frac{1}{2r}\left(v^2 - v_1^2 - v_2^2\right).$$

La puissance moyenne absorbée est

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt.$$

$$= \frac{1}{2rT}\left(\int_0^T v^2\,dt - \int_0^T v_1^2\,dt - \int_0^T v_2^2\,dt\right),$$

$$= \frac{1}{2r}\left(V^2 - V_1^2 - V_2^2\right). \qquad (2)$$

Dans cette formule V, V_1, V_2 représentent les différences de potentiel efficaces aux extrémités de R + r, R et r. Si l'on ne connaît pas r, il suffit de mesurer l'intensité efficace I du courant à l'aide d'un électrodynamomètre. On a, en remarquant que $I = \frac{V_2}{r}$,

$$P = \frac{1}{2V_2}\left(V^2 - V_1^2 - V_2^2\right).$$

Si l'on est certain de la constance du courant, les trois lectures peuvent être faites à l'aide du même voltmètre. Soient

$$V^2 = \frac{\alpha}{K}, \qquad V_1^2 = \frac{\alpha_1}{K}, \qquad V_2^2 = \frac{\alpha_2}{K},$$

α, α_1, α_2 étant les lectures du voltmètre, on a

$$P = \frac{\alpha - \alpha_1 - \alpha_2}{2Kr}.$$

Des erreurs de lecture $dx = -dx_1 = -dx_2$ entraînent une erreur limite

$$dP = \frac{3\,d\alpha}{2\,K\,r}.$$

d'où

$$\frac{dP}{P} = \frac{3\,d\alpha}{\alpha - \alpha_1 - \alpha_2}.$$

Pour trouver les meilleures conditions d'expérience, supposons que α soit la plus grande lecture possible au voltmètre et cherchons le rapport $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = n$ le plus favorable.

L'erreur $\frac{dP}{P}$ sera minima pour $\alpha_1 + \alpha_2$ minimum.

V_1 et V_2 ont pour résultante géométrique V, de sorte que pour un angle de phase φ, on a

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2\,V_1\,V_2\cos\varphi$$

ou

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + 2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\cos\varphi;$$

d'où

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha - 2\sqrt{\alpha_1\alpha_2}\cos\varphi$$

et

$$\alpha_2(1+n) = \alpha 2 - \alpha_2\sqrt{n}\cos\varphi.$$

Il en résulte que

$$\alpha_2 = \frac{\alpha}{1 + n + 2\sqrt{n}\cos\varphi}.$$

Par suite

$$\alpha_2(1+n) = \frac{\alpha(1+n)}{1 + n + 2\sqrt{n}\cos\varphi}.$$

Pour rendre cette quantité minima, il faut que $n = 1$. Alors

$$\frac{dP}{P} = \frac{3\,d\alpha}{\alpha - 2\,\alpha_2} = \frac{3(1+\cos\varphi)}{\cos\varphi}\,\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Cette expression montre que l'erreur croît avec φ et qu'elle peut atteindre une valeur importante dans les mesures effectuées sur des transformateurs fonctionnant à circuit ouvert.

Méthode de M. Fleming. — Pour que la méthode précédente soit possible, il faut disposer d'une différence de potentiel presque double de celle qu'absorbe la résistance utile, car on a, en appelant φ l'angle de phase entre V_1 et V_2,

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2\,V_1V_2\cos\varphi.$$

Pour tourner cette difficulté, M. Fleming place la résistance sans réactance r en dérivation par rapport à la résistance à réactance R, et mesure le courant efficace total I, le courant efficace I_1 et le courant efficace I_2 qui traversent respectivement R et r.

En raisonnant comme ci-dessus, on obtient

$$P = \frac{r}{2}\left(I^2 - I_1^2 - I_2^2\right) = \frac{V}{2I_2}\left(I^2 - I_1^2 - I_2^2\right).$$

L'erreur relative sur P est minima lorsque $I_1 = I_2$, ce qui entraîne la nécessité de disposer d'un courant presque double du courant absorbé par le circuit soumis à l'essai.

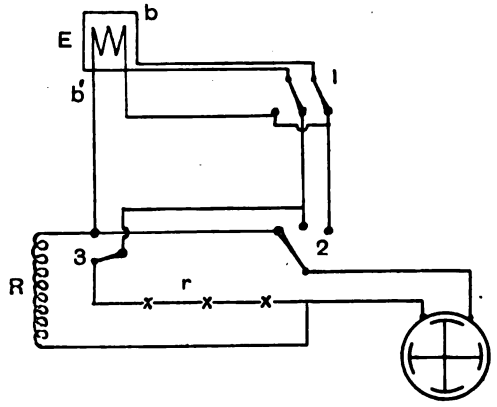


Fig. 126.

Le grand nombre de lectures que comportent les deux méthodes que nous venons d'étudier amène des erreurs qui peuvent devenir considérables en s'accumulant. De plus, par suite des irrégularités inévitables dans le fonctionnement des alternateurs, il convient de faire simultanément les lectures, ce qui nécessite l'emploi de trois ou quatre appareils de mesure et exige de nombreuses observations.

Ces raisons font préférer le wattmètre qui, employé avec les précautions recommandées par M. Fleming, donne des résultats plus satisfaisants.

Lorsque l'alternateur, utilisé comme source de courant, fournit une différence de potentiel constante, les trois déterminations d'intensité peuvent être faites au moyen du même électrodynamomètre. Le montage suivant, dû à M. Behn-Eschenburg, permet de déterminer très rapidement le courant utile dans le conducteur étudié, la différence de potentiel à ses extrémités et la puissance absorbée, fig. 126. Ce montage, indiqué dans la fig. 126, comporte les commutateurs 1, 2 et 3. Le commutateur 1 sert à intervertir le courant dans la bobine mobile de l'électrodynamomètre E, afin d'obtenir des déviations de même sens. Les connexions figurées permettent de mesurer le courant I_2 qui passe dans la résistance sans réactance r. Cette résistance ayant été déterminée à chaud par des mesures préalables, on connaît ainsi la différence de potentiel E_{eff} développée par l'alternateur. En amenant la manette 2 sur la touche médiane, on mesure le courant I_1 dans R. Enfin, en reculant en outre la manette 3 vers la gauche, on mesure le courant total I.

On transforme l'électrodynamomètre en wattmètre en disposant la manette 2 sur la touche de droite, en déplaçant la manette 3 vers la droite et la manette 1 vers la gauche. Le courant qui traverse la bobine mobile b passe alors dans la résistance r et la bobine fixe b' est en série avec la résistance R. La déviation mesure donc la puissance moyenne dépensée dans celle-ci.

A titre de renseignement, nous ajouterons quelques autres méthodes d'un emploi beaucoup plus restreint.

Méthode de calorimètre. — Le conducteur à réactance TT', fig. 127, dans lequel se développe la puissance cherchée, transformée tout entière en chaleur par hypothèse, est enfermé dans un récipient en laiton placé à l'intérieur d'une seconde caisse de même métal. Des tubes livrent passage aux fils de connexion. L'espace entre les deux caisses est parcouru par un courant d'eau qui circule sous pression constante et se déverse dans un bac jaugé R. Des thermomètres indiquent la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de la double enveloppe. Lorsque le régime des températures est établi, ce qui demande parfois plusieurs heures, on note le

nombre de grammes d'eau qui s'écoule par seconde et la différence des indications des thermomètres. Le produit de ces quantités, multiplié par l'équivalent mécanique de la calorie-gramme, mesure la puissance cherchée. Outre sa lenteur, cette méthode, employée

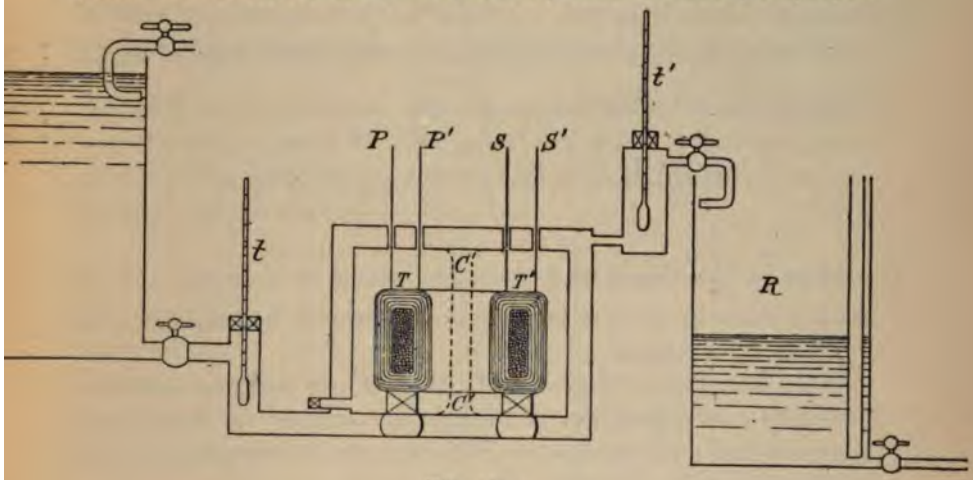


Fig. 127.

par M. Roïti pour l'essai des transformateurs, présente l'inconvénient de ne donner qu'une approximation assez faible par suite du peu d'écart qu'on obtient entre les températures initiale et finale, lorsqu'on se sert de thermomètres à mercure ; mais les méthodes bolométriques permettent d'obtenir une plus grande exactitude.

Méthode électrométrique. — M. Potier a montré comment l'électromètre à quadrants peut être employé pour mesurer les watts absorbés par une résistance à réactance traversée par des courants alternatifs. Appelons A et B les extrémités de cette résistance, C et D les extrémités d'une résistance sans réactance r en série avec la première, et soient V_1, V_2, V_3, V_4 les potentiels instantanés en ces points. Joignons l'une des paires de quadrants de l'électromètre à A, l'autre paire à B et l'aiguille au point C.

La déviation

$$\theta = \frac{1}{KT}\int_0^T (V_1 - V_2)\left(V_3 - \frac{V_1 + V_2}{2}\right) dt.$$

Si l'aiguille est ensuite réunie au point D, on a

$$\theta' = \frac{1}{K\,T}\int_0^T (V_1 - V_2)\left(V_4 - \frac{V_1 + V_2}{2}\right) dt.$$

En soustrayant les deux équations membre à membre et multipliant par $\frac{K}{r}$, on obtient

$$\frac{K(\theta - \theta')}{r} = \frac{1}{r\,T}\int_0^T (V_1 - V_2)(V_3 - V_4)\, dt.$$

Mais $\frac{V_3 - V_4}{r}$ représente à chaque instant le courant; donc le second membre indique la puissance moyenne dépensée dans la résistance à réactance.

MM. Blondlot et Curie et M. Morelli ont imaginé indépendamment une disposition permettant de ramener les deux expériences à une seule mesure et de constituer un wattmètre électrostatique à lecture directe.

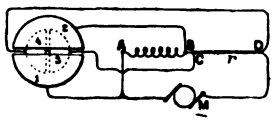


Fig. 128.

L'appareil employé est un électromètre dont la partie fixe se compose d'un tambour fendu en deux demi-cylindres plats, 1 et 2. La partie mobile est un disque divisé également en deux moitiés 3 et 4, isolées l'une de l'autre et communiquant séparément avec l'extérieur par deux fils métalliques constituant une suspension bifilaire.

Les extrémités de la résistance à réactance sont reliées aux demi-cylindres fixes; les extrémités de la résistance sans réactance aux deux parties du disque. La déviation θ est proportionnelle au produit moyen des différences $V_1 - V_2$, $V_3 - V_4$. On a donc

$$\theta = \frac{1}{K}\left[(V_1 - V_2)\,I\right]_{moy} = \frac{P}{K}.$$

La constante K se détermine en envoyant dans les résistances un courant continu, la puissance étant mesurée par les procédés ordinaires.

Ces méthodes électrométriques donnent lieu à des erreurs croissant avec les potentiels et causées, en grande partie, par une légère inégalité dans la distance des quadrants à la partie mobile.

Mesure de la puissance dans le cas des courants polyphasés. — Considérons le cas le plus compliqué qu'on rencontre dans les applications, celui des courants triphasés et supposons qu'on ait affaire au montage en étoile.

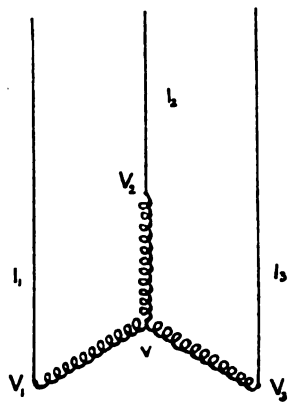


Fig. 129.

La puissance dépensée dans les 3 branches est, à un moment quelconque,

$$p = I_1 (V_1 - v) + I_2 (V_2 - v) + I_3 (V_3 - v), \qquad (1)$$

les signes des courants et des différences de potentiel étant implicites.

Comme on a, d'autre part, la condition générale, caractéristique des courants polyphasés,

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0, \qquad (2)$$

on voit que

$$p = I_1 V_1 + I_2 V_2 + I_3 V_3, \qquad (3)$$

expression qui, par la combinaison de (2) et (3), peut être ramenée à

$$p = I_1 (V_1 - V_3) + I_2 (V_2 - V_3). \qquad (4)$$

Dans le cas du montage en triangle, il vient

$$p = i_1 (V_1 - V_2) + i_2 (V_2 - V_3) + i_3 (V_3 - V_1), \qquad (5)$$

avec

$$i_1 + i_2 + i_3 = o,$$

et

$$I_1 = i_1 - i_3,$$
$$I_2 = i_2 - i_1,$$

d'où

$$p = I_1 (V_1 - V_3) + I_2 (V_2 - V_3), \qquad (6)$$

équation identique à (4).

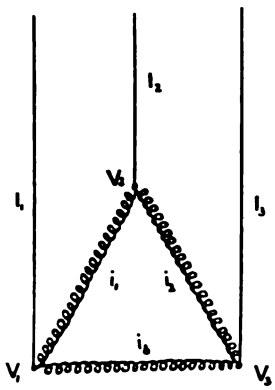


Fig. 130.

Pour obtenir l'expression de la puissance moyenne, il suffit de prendre la somme des moyennes des produits formant les seconds membres des équations (1), (5) ou (6),

$$P = \frac{1}{T}\int_o^T I_1 (V_1 - v)\, dt + \frac{1}{T}\int_o^T I_2 (V_2 - v)\, dt + \frac{1}{T}\int_o^T I_3 (V_3 - v)\, dt,$$

$$P = \frac{1}{T}\int_o^T i_1 (V_1 - V_2)\, dt + \frac{1}{T}\int_o^T i_2 (V_2 - V_3)\, dt + \frac{1}{T}\int_o^T i_3 (V_3 - V_1)\, dt,$$

$$P = \frac{1}{T}\int_o^T I_1 (V_1 - V_3)\, dt + \frac{1}{T}\int_o^T I_2 (V_2 - V_3)\, dt. \qquad (9)$$

Les sommes constituant les seconds membres des équations (7) et (8) peuvent être obtenues à l'aide de 3 wattmètres. Si θ, θ' et θ'' sont les indications des trois appareils dont les constantes sont k, k' et k''

$$P = \frac{\theta}{k} + \frac{\theta'}{k'} + \frac{\theta''}{k''}.$$

On peut combiner les trois wattmètres en un seul, en superposant le long d'un même axe les 3 bobines mobiles et en faisant agir celles-ci respectivement sur les bobines fixes correspondantes. Enfin, si le générateur fournit un courant suffisamment constant et si l'énergie absorbée par les appareils de mesure et la réactance de ceux-ci peuvent être négligées, un seul wattmètre ordinaire, intercalé successivement dans les trois branches du circuit, peut donner les trois termes de la puissance.

En appliquant l'équation (9), on peut se contenter de deux wattmètres ou d'un wattmètre double. Il est à remarquer que les deux termes du second membre de cette équation peuvent être de signes contraires; il faut, dans ce cas, prendre la différence des indications des wattmètres qui accusent alors des déviations inverses. Si l'on emploie un wattmètre double, les actions des enroulements fixes sur les bobines mobiles s'ajoutent ou se retranchent suivant les cas.

Chapitre XVI.

COMPTEURS ÉLECTRIQUES.

Coulombmètres et Joulemètres. — Dans une distribution électrique, la redevance doit être calculée d'après la quantité d'énergie utilisée. Toutefois, comme dans la plupart des cas, la distribution s'effectue sous une tension sensiblement constante, l'énergie disponible est proportionnelle à la quantité d'électricité fournie. Il suffit donc de disposer un appareil qui totalise cette quantité pour obtenir une base de taxation convenable. Il résulte de là que la grande majorité des compteurs sont des mesureurs de quantité d'électricité ou des *coulombmètres*.

On remarquera que, si le rapport du coefficient de self-induction à la résistance des récepteurs est variable, le retard de phase du courant varie également. Par suite, l'expression de la puissance électrique alternative $\frac{E\ I}{2} \cos \varphi$ montre que, pour une différence de potentiel efficace constante, l'énergie fournie n'est plus alors proportionnelle à la quantité d'électricité débitée. Dans ce cas, les *joulemètres* seuls donnent des indications correctes.

Coulombmètre Edison. — Dans l'hypothèse d'un courant continu, le voltamètre est tout naturellement indiqué puisque le dépôt électrolytique est proportionnel à la quantité d'électricité

qui a traversé cet appareil. M. Edison a employé un voltamètre à sulfate de zinc et à électrodes de zinc. Afin d'éviter l'introduction d'une résistance trop considérable dans le circuit principal, le courant qui alimente les récepteurs traverse une bande de maillechort R. Les voltamètres V, V′ sont dérivés sur cette bande ; chacun d'eux est en série avec une bobine de fil de cuivre *r r′*. La résistance d'un des voltamètres et de la bobine additionnelle est calculée de manière que l'électrolyte soit traversé par la millième partie du courant d'alimentation. Le but des bobines *r r′* est de compenser les variations de résistance de l'électrolyte. Lorsque la température

Fig. 131.

change, la résistance du liquide varie en sens inverse de celle du cuivre, et des mesures sont prises pour qu'il y ait une exacte compensation. Afin d'empêcher la congélation du liquide, une bilame B ferme le circuit d'une lampe L, lorsque la température descend trop fortement. La lampe reste allumée jusqu'à ce que la chaleur qu'elle dégage ait ramené la bilame dans la position normale. Chaque mois, un contrôleur retire un des voltamètres qu'il porte à l'usine, afin de vérifier l'accroissement de poids de la cathode ; pendant ce temps, l'autre voltamètre totalise le courant utilisé par l'abonné.

L'appareil est peu coûteux, mais les manipulations qu'il entraîne l'ont fait abandonner. Il permet de totaliser le débit d'un courant continu variant du simple au décuple, avec une approximation de 2 à 3 pour cent. Cette erreur n'est pas supérieure à celle des compteurs à eau ou à gaz. L'appareil ne s'applique évidemment pas aux courants alternatifs.

Compteurs Aron. — Plusieurs distributions électriques utilisent un compteur reposant sur un principe découvert par MM. Ayrton et Perry. Le balancier d'une horloge est terminé par un aimant qui oscille au-dessus d'une bobine traversée par le courant.

Fig. 132.

Celui-ci peut être orienté dans la bobine de manière à agir en sens inverse de la gravité ou dans le même sens et, par suite, à retarder ou à accélérer le mouvement du balancier. Il en résulte un retard ou une avance de l'horloge, en rapport avec l'intensité du courant et le temps pendant lequel ce dernier a passé.

Comme la variation est faible, M. Aron a imaginé une disposition ingénieuse pour l'enregistrer avec exactitude. Le compteur contient deux horloges identiques, l'une pourvue d'un balancier ordinaire, l'autre du balancier magnétique. Les mécanismes de ces horloges sont reliés par un train d'engrenages différentiels qui totalise les différences de vitesse des deux mouvements sur une série de cadrans

analogue à celle des compteurs à eau et à gaz. Les changements de température agissant également sur les deux balanciers n'influencent pas sensiblement le compteur. On voit dans un coin de la boîte un fil à plomb servant à mettre l'appareil de niveau.

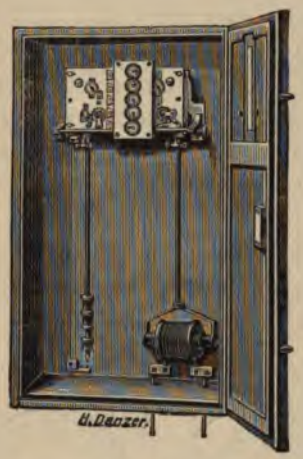


Fig. 133.

Les indications de l'instrument dépendent de la permanence du magnétisme du balancier de droite. Un courant intense, provoqué par exemple par un court-circuit momentané dans l'installation, suffit parfois pour modifier profondément l'aimantation du barreau. De plus, il est assez facile de frauder en disposant un aimant dans le voisinage du compteur de manière à annuler l'effet du courant.

Lorsqu'il s'agit de totaliser l'énergie absorbée par un circuit ou simplement de desservir une distribution par courants alternatifs, on adopte une combinaison reposant sur le principe du wattmètre, fig. 133. La bobine fixe, formée de gros fil et parcourue par le courant utilisé, est placée horizontalement. A l'intérieur de cette bobine oscille une bobine de fil fin supportée par le balancier de droite à l'aide d'un étrier et reliée aux points d'entrée et de sortie du circuit desservant les récepteurs. La variation d'allure des deux mouvements d'horlogerie est proportionnelle à l'action mutuelle

des deux bobines, c'est-à-dire à la puissance moyenne multipliée par le temps.

Des expériences, faites par M. Kapp sur un compteur Aron pour courants continus de 25 ampères, montrent que la constante de l'instrument ne varie que de 0,5 pour 100 en dehors de la constante moyenne, lorsque le courant passe de 0,65 à 25 ampères, la puissance absorbée par l'appareil étant, au maximum, de 9 watts.

Le compteur pour courants alternatifs présente des constantes différentes suivant la période du courant, à cause de la self-induction de la bobine en dérivation. M. Kapp a reconnu que l'erreur maxima est alors de 1,25 pour 100.

Compteur Aron pour courants triphasés. — Considérons une dynamo A alimentant un moteur triphasé B. Appelons i_1, i_2, i_3 les courants circulant à travers les bobines 1, 2, 3 de ce dernier à

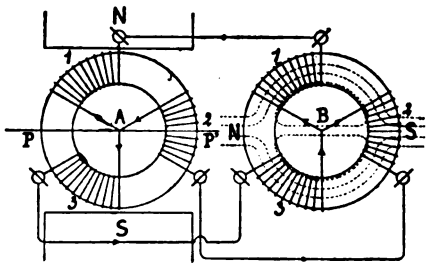


Fig. 134.

un moment quelconque; e_1, e_2, e_3 les différences de potentiel correspondantes aux extrémités de ces bobines.

La puissance électrique dépensée dans le moteur, à l'instant considéré, est

$$p = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3. \qquad (1)$$

Il faudrait trois joulemètres si l'on voulait relever la puissance d'après cette formule ou encore un pendule portant trois bobines de fil fin mobiles dans trois bobines de gros fil.

On peut simplifier l'appareil en remarquant que, en vertu des propriétés des courants polyphasés,

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0. \qquad (2)$$

D'autre part

$$i_1 + i_2 - i_3 = o. \qquad (3)$$

En éliminant i_3 et e_3 entre les trois équations, il vient

$$p = e_1 i_1 + e_2 i_2 - (i_1 + i_2)(e_1 + e_2) = -(e_1 i_2 + e_2 i_1).$$

Cette équation, qui est vraie à un moment quelconque, se vérifie également pour les intégrales donnant la puissance moyenne

$$\frac{1}{T}\int_o^T p\, dt = P.$$

On peut donc se borner à fixer au pendule du compteur Aron deux solénoïdes à fil fin réunis, par l'intermédiaire de résistances convenables sans self-induction, aux extrémités des bobines 1 et 2.

Ces deux solénoïdes sont placés respectivement dans deux solénoïdes à gros fil parcourus par les courants i_2 et i_1. Les actions des deux couples d'enroulements s'ajoutent et amènent un retard proportionnel à l'énergie consommée.

Coulombmètre de Ferranti. — Cet appareil est un véritable moteur électrique reposant sur le principe de la rotation des liquides dans un champ magnétique. Le champ est engendré par une bobine G

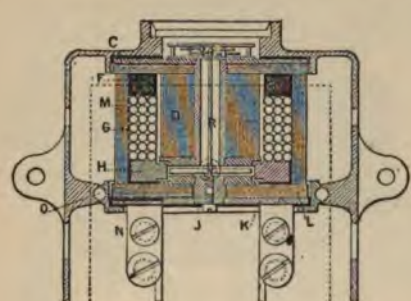


Fig. 135.

traversée par le courant à totaliser et garnie intérieurement et extérieurement de cylindres formés de tôles fines en fer. Dans une cavité ménagée dans la culasse en fer réunissant ces

cylindres et remplie de mercure, tourne une roue à ailettes dont l'axe engrène avec un mécanisme totalisateur analogue à celui du compteur précédent.

Le courant à mesurer traverse le mercure du centre à la périphérie de la cavité, normalement aux lignes de force produites par l'électro-aimant. Le métal liquide prend un mouvement de rotation et entraîne avec lui la roue à ailettes, en vertu de la force électromagnétique, laquelle est sensiblement proportionnelle au carré de l'intensité du courant. Les résistances de frottement varient comme le carré de la vitesse du mouvement, en sorte qu'il y a proportionnalité entre le courant et la vitesse. Le nombre de tours de la roue mobile totalise par conséquent le courant.

Pour adapter cet appareil à l'enregistrement des courants alternatifs, M. de Ferranti a divisé le noyau de fer de manière à éviter les courants de Foucault.

Joulemètre E. Thomson. — On doit à M. E. Thomson un joulemètre convenant également aux courants continus et aux courants alternatifs, fig. 136. Deux bobines de gros fil, traversées

Fig. 136.

par le courant de circulation, servent d'inducteurs à une bobine mobile de fil fin à laquelle on ajoute une résistance extérieure sans self-induction et qu'on place en dérivation sur le circuit utile.

Un commutateur, analogue à celui de Gramme, est disposé sur l'axe de rotation vertical de la bobine de fil fin, qui prend un

mouvement rotatoire sous l'influence d'un couple électrodynamique proportionnel aux watts consommés et équilibré, lorsque la vitesse de régime est atteinte, par la réaction des courants de Foucault développés dans un disque en cuivre entraîné entre les pôles d'aimants permanents. Afin de neutraliser les frottements, on a muni les inducteurs d'un enroulement supplémentaire de fil fin, disposé en série avec l'induit, parcouru par le courant dérivé et produisant un couple égal à celui des frottements. Le nombre de révolutions de cet induit sans fer est enregistré par les aiguilles des cadrans supérieurs.

L'instrument consomme 7,5 watts lorsque la puissance utilisée est 2,500 watts; il enregistre dès que cette puissance atteint 10 watts. L'inventeur garantit l'exactitude des indications à $^1/_2$ pour 100 près. Après un court-circuit, il arrive que les aimants amortisseurs sont modifiés par les courants excessifs qu'ils développent dans le disque.

Coulombmètre Schallenberger. — Le compteur Schallenberger est adapté exclusivement aux courants alternatifs. Un disque

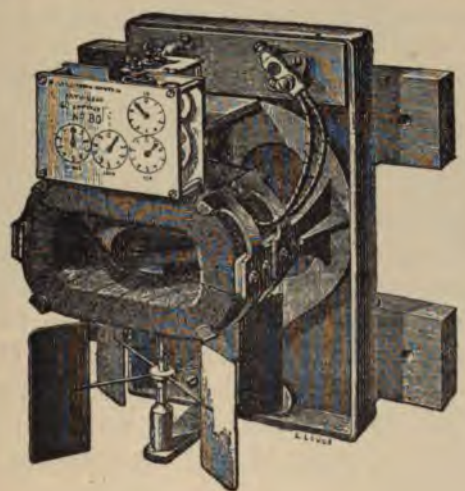


Fig. 137.

mobile en fer, soumis à l'action combinée du courant principal et du courant induit par celui-ci dans une bobine fermée sur elle-

même et inclinée de 45° par rapport à la bobine principale, prend un mouvement de rotation régularisé par une roue à ailettes tournant dans l'air. Le nombre de tours s'enregistre comme précédemment sur des cadrans totalisateurs.

Ce compteur et celui de M. Ferranti, qui sont des coulombmètres, donnent des indications inexactes dans le cas de variations du décalage du courant.

Compteur Frager. — Le compteur Frager comprend trois parties distinctes :

1° Un ampèremètre ou un wattmètre, dont la déviation est proportionnelle à l'intensité du courant ou à la puissance qu'on veut mesurer.

2° Un mécanisme communiquant un mouvement de rotation lent et continu (un tour par 100 secondes) à une came qui rencontre l'aiguille de l'appareil précédent pendant un temps variable avec l'amplitude de la déviation.

3° Un compteur à cadrans mis en mouvement pendant toute la durée du contact de la came avec l'aiguille indicatrice.

Il résulte de cette combinaison que les cadrans enregistrent des nombres proportionnels aux produits par le temps de l'intensité ou de la puissance indiquée, c'est-à-dire qu'ils totalisent la quantité d'électricité ou l'énergie fournie.

Le compteur Siemens et Halske est basé sur le même principe.

Compteur Brillé. — Le compteur Brillé comprend un wattmètre dont la bobine à fil fin B, suspendue à un fil dont la torsion est négligeable, est solidaire d'un cercle en cuivre D engagé entre les branches d'une série d'aimants permanents en fer à cheval E. Ceux-ci sont disposés en couronne autour d'un axe C, situé dans le prolongement de l'axe A de la bobine, mais indépendant de ce dernier. Un petit moteur électrique M, attaquant la partie inférieure de l'axe C, fait tourner la couronne d'aimants et entraîne les rouages du totalisateur.

La rotation des aimants induit des courants de Foucault dans le cylindre de cuivre, qui tend à suivre le mouvement et à retenir la bobine mobile du wattmètre, laquelle tend, d'autre part, à dévier

en sens inverse sous l'action de l'enroulement fixe à gros fil II. L'effort d'entraînement que subit le cercle est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur, tandis que l'effort déviant que développe le wattmètre est proportionnel à la puissance absorbée par le circuit d'utilisation dans lequel le compteur est inséré.

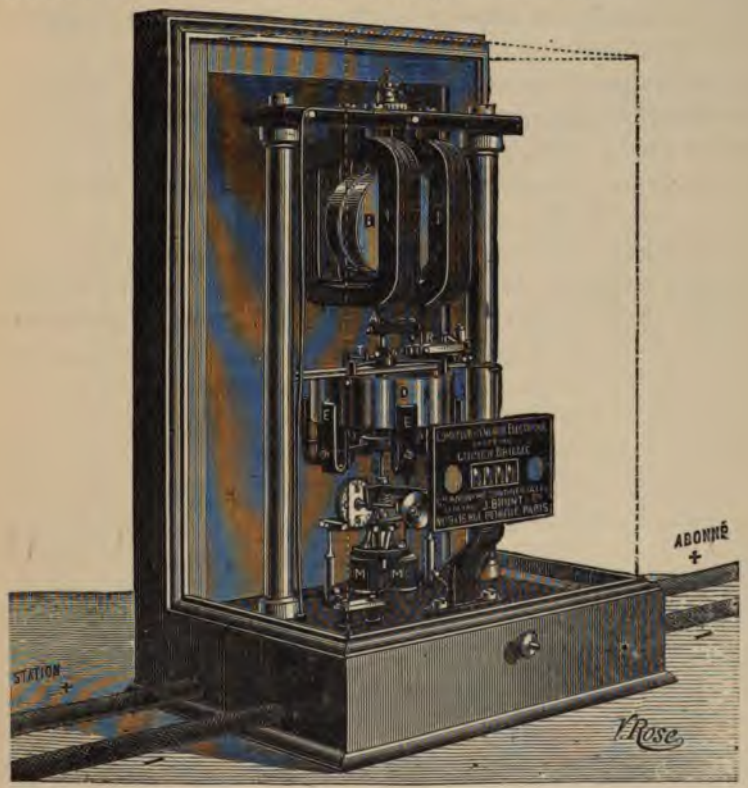


Fig. 138.

Le rôle du wattmètre est de régler à chaque instant la vitesse du moteur de telle manière qu'il y ait équilibre entre les deux efforts. Dans ces conditions, les indications du totalisateur sont proportionnelles à l'énergie électrique consommée. A cet effet, l'axe A, portant la bobine mobile du wattmètre et le cercle de cuivre, agit sur le levier R d'un rhéostat à quatre touches intercalé dans le circuit du moteur : ce rhéostat est destiné à régler le cou-

rant fourni au moteur, en le faisant passer de zéro à un maximum lorsque l'axe A tourne sous l'action prépondérante de la bobine B et en l'affaiblissant, au contraire, jusqu'à l'annuler lorsque l'entraînement magnétique l'emporte. En fonctionnement normal, la bobine B effectue de légères oscillations autour de sa position de repos, en corrigeant ainsi constamment la vitesse du moteur.

Tarage des compteurs. — Avant de procéder au tarage d'un compteur, il y a lieu, quand il s'agit d'un appareil du genre de celui inventé par M. Aron, de vérifier le synchronisme des deux pendules lorsqu'aucun courant ne traverse les enroulements. Dans ces conditions, les aiguilles du totalisateur doivent rester immobiles. On corrige les différences en modifiant la position du contrepoids d'un des pendules. Le synchronisme parfait est assez difficile à réaliser. Quand l'écart n'est pas trop considérable, on peut assurer

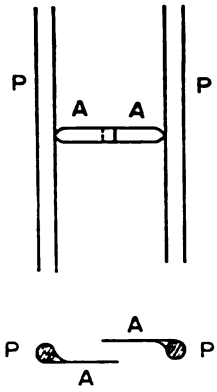


Fig. 139.

l'identité de marche des pendules par le procédé suivant, expérimenté par M. Jones : deux aimants très légers A A sont fixés latéralement aux pendules P P de telle sorte que leurs extrémités libres de polarités contraires se recouvrent et soient distantes de quelques millimètres. L'attraction des aimants établit entre les deux pendules une solidarité qui a pour effet de ralentir l'appareil qui bat trop vite en même temps qu'elle accélère le mouvement de l'autre.

La différence des indications du totalisateur d'un compteur est proportionnelle, suivant le cas, à la quantité d'électricité ou à l'énergie électrique consommée dans le circuit d'utilisation pendant l'intervalle du temps qui a séparé les lectures. C'est la détermination de la constante de proportionnalité qui constitue le tarage de l'appareil; à cet effet, on met le compteur en service et l'on mesure la quantité d'électricité q ou l'énergie électrique w qu'il doit enregistrer, à l'aide d'un ampèremètre ou d'un wattmètre et d'un compte-secondes; d et d' étant les lectures relevées au début et à la fin de l'expérience, on a

$$k = \frac{q}{d' - d} \text{ ou } \frac{w}{d' - d}.$$

Quand l'essai est de longue durée, on a recours à des appareils de mesure enregistreurs. Dans le cas des coulombmètres, on peut aussi évaluer la quantité d'électricité par un dépôt électrolytique.

Le plus souvent, il est possible d'abréger le tarage en déterminant la quantité d'électricité ou l'énergie correspondant à un nombre donné de tours de celui des mobiles dont la vitesse est la plus grande. L'examen du système d'engrenages reliant ce mobile au totalisateur fait connaître le nombre de tours du premier que représente une division du cadran des unités.

Ainsi, dans le compteur E. Thomson, il faut 100 révolutions de l'induit du moteur pour faire avancer l'aiguille des unités d'une division. La constante de l'appareil est donc égale au nombre de watts-heures correspondant à ce nombre de tours. Si la constante trouvée diffère de celle renseignée par le constructeur, on peut la ramener à cette valeur en modifiant la position d'un des aimants permanents. En approchant les pôles de ceux-ci de l'axe de rotation du disque de cuivre, on diminue l'amortissement.

Chapitre XVII.

MESURE D'UNE DIFFÉRENCE DE PHASE.

Méthode de Blakesley. — L'angle de phase entre une différence de potentiel sinusoïdale et le courant qui en résulte dans un conducteur à réactance est donné par la comparaison entre les watts mesurés, comme on l'a vu plus haut, à l'aide du wattmètre et les watts indiqués par le produit de l'intensité efficace par la différence de potentiel efficace. Ce dernier produit est $E_{eff}\ I_{eff}$ et l'indication du wattmètre est la mesure du produit $E_{eff}\ I_{eff}\ \cos\varphi$, dans l'hypothèse de courants sinusoïdaux. Le rapport fait connaître $\cos\varphi$, d'où φ. Si le courant n'est pas sinusoïdal, c'est le *facteur de puissance* que mesure le rapport ci-dessus.

Pour déterminer l'angle de phase entre deux courants, M. Blakesley a proposé une méthode reposant sur l'emploi de trois électrodynamomètres. L'un des courants traverse le premier appareil et l'une des bobines du deuxième, le second courant parcourt la seconde bobine et le troisième appareil.

L'indication du deuxième instrument mesure $I_{eff}\ I'_{eff}\cos\varphi$, tandis que les deux autres électrodynamomètres donnent I_{eff} et I'_{eff}. On déduit de là la valeur de $\cos\varphi$.

Méthode graphique de M. Janet pour déterminer une différence de phase entre un potentiel et un courant. — Sur un tambour d'enregistreur, on tend une feuille de papier imbibé d'une solution de ferro-cyanure potassique et d'azotate ammonique (parties égales des solutions saturées et 6 parties d'eau). Si l'on appuie sur le papier un style d'acier à pointe un peu émoussée et si l'on fait passer un courant périodique à travers le papier par l'intermédiaire du style, on observe, chaque fois que le potentiel de la pointe dépasse une certaine valeur positive, une trace bleue due à la décomposition du cyanure. En donnant au tambour un mouvement de rotation et en réglant convenablement la différence de potentiel entre le style et le tambour, on obtient une succession de traits courts, dont le nombre permet de déduire la période du courant alternatif, si l'on connaît la vitesse de rotation du tambour. Pour obtenir un enregistrement net, le papier, après avoir trempé pendant quelques heures dans la solution, est tendu et séché imparfaitement par un papier buvard, de manière à présenter un aspect mat. Après l'inscription, on lave à grande eau.

On remarquera que l'appareil présente une grande résistance électrique et pas de réactance; il peut servir de voltmètre. Deux styles semblables permettent de déterminer l'angle de phase entre une différence de potentiel et le courant qu'elle produit dans une résistance inductive. On met, à la suite de cette dernière, un conducteur sans réactance parcouru par le même courant. On dérive les deux styles et le tambour sur ces deux conducteurs et l'on obtient des traces correspondant aux maxima de la différence de potentiel et du courant.

Chapitre XVIII.

MESURE DES COEFFICIENTS D'INDUCTION.

Coefficients de self-induction. — Le coefficient de self-induction $\mathfrak{L}$ d'un circuit de résistance r, dans lequel agit une force électromotrice e, est défini par l'équation

$$i = \frac{e - d\frac{\mathfrak{L}i}{dt}}{r} = \frac{e - \frac{d\mathfrak{N}}{dt}}{r},$$

$\mathfrak{N}$ étant le flux dû au courant qui traverse le circuit.

Dans le cas où le circuit est dépourvu de fer, le facteur $\mathfrak{L}$ est constant et l'expression de la force électromotrice de self-induction peut être mise sous la forme

$$-\mathfrak{L}\frac{di}{dt}.$$

Si, au contraire, on considère un électro-aimant, le coefficient d'induction est variable et deux définitions peuvent être adoptées.

Quelques électriciens conservent, dans ce cas, à l'expression de la force électromotrice de self-induction la forme précédente et posent

$$e' = -\mathfrak{L}_1\frac{di}{dt},$$

d'où

$$\mathfrak{L}_1 = \frac{d\mathfrak{N}}{di};$$

d'autres, plus nombreux, adoptent la forme

$$e' = -\frac{d(\mathfrak{L}_2 i)}{dt},$$

d'où

$$\mathfrak{L}_2 = \frac{\mathfrak{N}}{i}.$$

La seconde définition a l'avantage de rendre le coefficient de self-induction proportionnel au coefficient de perméabilité μ, car dans le cas d'un circuit magnétique fermé, sans perte de flux,

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = \frac{\mathfrak{N}}{s \times 4\pi n_1 i};$$

d'où, si l'enroulement magnétisant comporte n spires,

$$\mathfrak{L}_2 = 4\pi n_1 n s \mu. \qquad (1)$$

Toutes les méthodes qui permettent de mesurer la perméabilité magnétique du circuit conduisent, par conséquent, à la connaissance du coefficient $\mathfrak{L}_2$.

C'est pour cette raison que nous adoptons la deuxième définition.

Pour éviter toute confusion, M. Blondel a proposé de réserver au coefficient $\mathfrak{L}_1$ le nom de *coefficient de réaction propre*.

On peut représenter graphiquement les deux coefficients en traçant la courbe empirique $\mathfrak{N} = f(i)$ de l'électro-aimant. Pour une valeur donnée de i, le coefficient $\mathfrak{L}_1$ est le coefficient angulaire de la tangente au point correspondant de la courbe, tandis que $\mathfrak{L}_2$ est le coefficient angulaire de la droite qui joint ce point à l'origine des coordonnées.

On a d'ailleurs, entre les deux valeurs $\mathfrak{L}_1$ et $\mathfrak{L}_2$, la relation

$$\mathfrak{L}_1 di = d(\mathfrak{L}_2 i) = \mathfrak{L}_2 di + i\, d\mathfrak{L}_2;$$

d'où

$$\mathfrak{L}_1 = \mathfrak{L}_2 + i\frac{d\mathfrak{L}_2}{di}.$$

---

(1) Eric GERARD. *Leçons sur l'Électricité*, 4e édition, § 152.

Il résulte de ce qui précède que le coefficient de self-induction d'un électro-aimant est une quantité essentiellement variable, qu'il convient de déterminer pour les valeurs du courant qui traverse normalement l'électro-aimant. Ces déterminations peuvent se faire aisément, si la forme de ce dernier se prête à la mesure de la perméabilité du noyau, par l'une des méthodes qui seront exposées dans le chapitre relatif à la mesure des perméabilités.

Dans le cas contraire, on peut déterminer $\mathfrak{L}$ en mesurant le flux d'électricité que transporte l'extra-courant de la bobine, soit par la méthode balistique, soit par une méthode de réduction à zéro en neutralisant l'extra-courant par celui d'une bobine étalon ou par la décharge d'un condensateur. On n'obtient toutefois par ce moyen que la différence entre le flux magnétique temporaire $\mathfrak{N}$ et le flux rémanant $\mathfrak{N}'$. On a, en effet, pour l'expression du flux électrique, en appelant r la résistance du circuit,

$$q = \frac{\mathfrak{N} - \mathfrak{N}'}{r} = \frac{(\mathfrak{L}i) - (\mathfrak{L}i)'}{r}.$$

D'un autre côté, il est difficile, dans les méthodes basées sur la mesure des extra-courants, d'adopter les courants normaux utilisés par les électro-aimants, sauf pour les petits appareils employés en télégraphie et en téléphonie. Dans le cas d'électro-aimants industriels, les praticiens emploient, par extension, la méthode de Joubert, décrite ci-après, qui donne une idée grossière, mais généralement suffisante, de la self-induction.

M. Blondel a proposé de faire passer, dans les électro-aimants industriels, un courant rendu variable par le moyen d'un rhéostat et d'enregistrer, par un oscillographe servant de voltmètre, la différence de potentiel e aux bornes de l'électro-aimant, pendant qu'on enregistre le courant i à l'aide d'un oscillographe utilisé comme ampèremètre.

On voit par l'équation

$$e - ir = \frac{(d\,\mathfrak{L}i)}{dt},$$

que si l'on déduit de la courbe des e des ordonnées égales à $i\,r$, on obtient les ordonnées du diagramme représentant les variations de $\mathfrak{L}i$ par rapport au temps. L'intégration de cette dernière courbe donne les valeurs de $\mathfrak{L}i$ et, par suite, celles de $\mathfrak{L}$.

Nous indiquerons dans ce qui suit les méthodes de mesure les plus employées pour les bobines dépourvues de fer, dont le coefficient de self-induction peut se déterminer d'une manière très précise à l'aide de courants faibles. Par extension, ces méthodes sont employées avec plus ou moins d'exactitude pour les électro-aimants.

Méthode directe pour comparer le coefficient de self-induction d'une bobine à celui d'une bobine étalon. — Emploi du commutateur de MM. Ayrton et Perry. — Nous avons décrit précédemment l'étalon de self-induction de MM. Ayrton et Perry. Cet appareil permet de déterminer de la manière la plus rapide le coefficient de self-induction d'une bobine. Pour cela, il suffit de former un pont

Fig. 140.

au moyen de deux branches non inductives b, d, de la bobine à étalonner c et de l'étalon a. On règle l'équilibre du galvanomètre pour le régime permanent en s'aidant d'une résistance à curseur, puis, en ouvrant et en fermant successivement la clef de la pile, on modifie le calage de la bobine mobile de l'étalon, jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro pendant le régime variable. On a alors la proportion

$$\frac{a}{c} = \frac{b}{d} = \frac{\mathfrak{L}_a}{\mathfrak{L}_c}.$$

En effet, la condition d'équilibre dans le régime permanent donne, par l'application de la seconde loi de Kirchhoff au circuit a, c, g, la relation suivante entre les courants dans les branches a et c du pont

$$a\,I_a = c\,I_c.$$

En appliquant cette loi au même circuit pendant la période variable, on a

$$a\,i_a + g\,i_g - c\,i_c = -\mathfrak{L}_a\frac{di_a}{dt} - \mathfrak{L}_g\frac{di_g}{dt} + \mathfrak{L}_c\frac{di_c}{dt}.$$

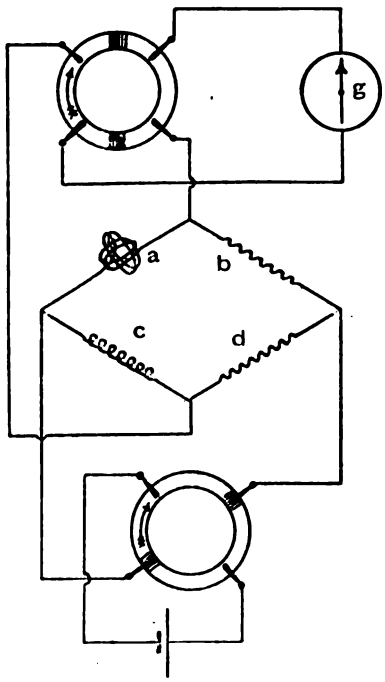


Fig. 141.

En intégrant cette équation, après avoir multiplié ses termes par dt, il vient

$$aq_a + g\,q_g - cq_c = -\mathfrak{L}_a\,I_a - \mathfrak{L}_g\,I_g + \mathfrak{L}_c\,I_c.$$

Si l'équilibre du galvanomètre est obtenu dans les deux régimes,

$$q_g = o$$

et

$$I_g = o;$$

de plus, la seconde loi de Kirchhoff, appliquée au circuit $a + b + c + d$, conduit à la relation

$$aq_a + bq_b - cq_c - dq_d = -\mathfrak{L}_a\,I_a + \mathfrak{L}_c\,I_c.$$

Lorsque $q_g = o$, $q_a = q_b$ et $q_c = q_d$; par suite

$$(a + b)\, q_a - (c + d)\, q_c = - \mathfrak{L}_a I_a + \mathfrak{L}_c I_c = a q_a - c q_c.$$

On tire de là

$$b q_a = d q_c$$

d'où, puisque $ad = bc$, $aq_a = cq_c$ et $\mathfrak{L}_a I_a = \mathfrak{L}_c I_c$.

On a donc enfin

$$\frac{\mathfrak{L}_a}{\mathfrak{L}_c} = \frac{I_c}{I_a} = \frac{a}{c} = \frac{b}{d}.$$

MM. Ayrton et Perry ont imaginé un commutateur permettant d'accroître considérablement la sensibilité de cette méthode, en accumulant, sur le galvanomètre, les effets des impulsions dues à des fermetures et à des ouvertures répétées du circuit de la pile, fig. 140 et 141. Dans ce but, les communications du pont avec le galvanomètre et la pile sont établies à l'aide de frotteurs appuyant sur deux disques mobiles composés de segments annulaires en cuivre.

Les mouvements des disques sont solidaires et ont pour effet d'ouvrir et de fermer alternativement le circuit de la pile, tandis que le galvanomètre est successivement raccordé au pont et mis en court-circuit. Les raccordements du galvanomètre au pont correspondent aux périodes variables d'ouverture et de fermeture et les connexions sont alternées par le jeu du commutateur, de telle sorte que les courants instantanés traversent le cadre galvanométrique dans le même sens. Grâce à cette méthode cumulative, un léger défaut d'équilibre s'accuse par une déviation sensible du galvanomètre.

La méthode de comparaison précédente peut encore être employée avec un étalon de self-induction invariable, à la suite duquel on ajoute des résistances réglables, mais alors il faut procéder à de longs tâtonnements pour rechercher des valeurs de b et d qui satisfassent à la fois à la condition

$$\frac{b}{d} = \frac{a}{c},$$

du régime permanent et à la condition

$$\frac{b}{d} = \frac{\mathfrak{L}_a}{\mathfrak{L}_c},$$

du régime variable.

Pour arriver à assurer l'équilibre dans le régime permanent, il est nécessaire, dans cette méthode comme dans plusieurs des méthodes suivantes, d'intercaler un rhéostat à curseur dans une branche du pont, afin de pouvoir en graduer exactement la résistance.

On peut discuter la méthode en raisonnant comme dans le cas du pont de Wheatstone. Si l'on calcule la valeur de b la plus favorable au point de vue de la sensibilité dans la période variable, on trouve, en appelant ρ la résistance de la pile et n le rapport $\frac{b}{d}$,

$$b = \sqrt{\frac{g\,a\,n\,[a + \rho\,(n+1)]}{g\,n + a\,(n+1)}}\ \text{(M. Gray)}.$$

Il ne faut pas s'attendre à obtenir, dans des mesures de ce genre, la même précision que celle qu'on peut atteindre dans la détermination des résistances, parce que les bobines du pont ont, en général, une self-induction et une capacité qui ne sont pas négligeables.

Méthodes indirectes. Méthode de Lord Rayleigh pour mesurer un coefficient de self-induction en fonction d'une résistance. — La bobine d, dont le coefficient de self-induction est £, est intercalée dans la quatrième branche d'un pont de Wheatstone monté à l'aide d'un galvanomètre balistique et de trois séries de conducteurs

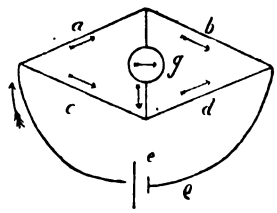


Fig. 142.

sans réactance (fig. 142). On règle d'abord les côtés pour le régime permanent, à la manière ordinaire. On ferme ensuite la diagonale du galvanomètre avant celle de la pile ; la réaction de self-induction de la bobine d amène une élongation α. Lors de l'ouverture du circuit de la pile, on obtient une élongation égale et de sens contraire. En

désignant par I_d le courant de régime dans la branche d, la quantité d'électricité que transporte l'extra-courant d'ouverture est

$$Q = \frac{\mathfrak{L}\, I_d}{d + b + \frac{g(a+c)}{g+a+c}};$$

la fraction de ce flux électrique dérivée dans le galvanomètre est

$$q = \frac{\mathfrak{L}\, I_d}{d + b + \frac{g(a+c)}{g+a+c}} \frac{a+c}{g+a+c} = \frac{\alpha}{K},$$

K représentant la constante balistique du galvanomètre.

On détruit ensuite l'équilibre permanent du pont en ajoutant à d une petite résistance r, ce qui produit, dans le galvanomètre, une déviation permanente δ.

Le courant qui traverse le galvanomètre est alors approximativement le même que si une force électromotrice égale à $r\, I'_d$ agissait dans la branche d, la diagonale de la pile étant interrompue.

On a donc

$$i = \frac{r\, I'_d}{d + b + \frac{(a+c)g}{a+c+g}} \frac{a+c}{a+c+g} = \frac{\delta}{k},$$

k étant la constante permanente du galvanomètre.

De la combinaison des équations précédentes, on déduit

$$\mathfrak{L} = r \frac{I'_d}{I_d} \frac{k}{K} \frac{\alpha}{\delta}.$$

Lorsqu'on emploie un galvanomètre sensible, la résistance r à ajouter à d est très faible, de sorte que les courants I_d et I'_d ne diffèrent que d'une quantité négligeable et que leur rapport est sensiblement égal à l'unité; la formule se réduit alors à

$$\mathfrak{L} = r \frac{k}{K} \frac{\alpha}{\delta}.$$

Si T_o est la période du galvanomètre non amorti, on a

$$\mathfrak{L} = r \frac{T_o}{\pi} \frac{\alpha}{\delta}.$$

On rend la méthode plus sensible en utilisant, comme l'a

suggéré M. Ledeboer, le commutateur de MM. Ayrton et Perry, qu'on actionne à l'aide d'un moteur dont on peut déterminer le nombre de révolutions par seconde. On obtient, dans ce cas, pour le régime variable, une déviation permanente δ' au lieu de l'élongation α. Cette déviation peut être considérée comme due à une force électromotrice $n\,\mathfrak{L}\,I_d$, si n désigne le nombre de fois que le courant est interrompu et rétabli par seconde. On a donc

$$\frac{n\,\mathfrak{L}\,I_d}{r\,I'_d} = \frac{\delta'}{\delta},$$

ou, si I'_d est sensiblement égal à I_d,

$$\mathfrak{L} = r\,\frac{\delta'}{\delta}\,\frac{1}{n}. \qquad (1)$$

Au point de vue de la sensibilité de la méthode, on remarquera que tout se passe comme si l'on avait accru la résistance de la branche d d'une quantité $\mathfrak{L}n$. On calculera donc l'erreur limite sur $\mathfrak{L}n$ de la même manière que l'on calcule, dans le cas du pont ordinaire, l'erreur qu'on peut commettre sur d et l'on adoptera les conditions les plus favorables indiquées à propos de la mesure des résistances. Il est facile de voir, par l'équation (1), que l'erreur absolue sur $\mathfrak{L}$ est d'autant plus faible que n est plus grand. Il ne faut pas toutefois que la vitesse du commutateur devienne telle que le régime variable soit inachevé au moment de la commutation. On s'en assure en variant légèrement n : il faut que la valeur trouvée pour d' ne change pas.

Méthode de M. Joubert. — Lorsqu'une bobine de résistance r et de self-induction constante $\mathfrak{L}$ est parcourue par un courant rigoureusement sinusoïdal, de fréquence n, son impédance est égale à

$$\sqrt{r^2 + 4\pi^2 n^2 \mathfrak{L}^2}.$$

Si l'on mesure l'intensité du courant I_{eff} à l'aide d'un électrodynamomètre et la différence de potentiel V_{eff} aux bornes de la bobine par le moyen d'un voltmètre spécial ou d'un électromètre, on a

$$\sqrt{r^2 + 4\pi^2 n^2 \mathfrak{L}^2} = \frac{V_{eff}}{I_{eff}},$$

d'où

$$\mathfrak{L} = \frac{1}{2\pi n}\left(\frac{V^2_{eff}}{I^2_{eff}} - r^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

On peut aussi mettre, à la suite de la bobine essayée, une résistance connue R sans réactance et déterminer la différence de potentiel V'_{eff} aux bornes de celle-ci. On a alors

$$\frac{\sqrt{r^2 + 4\pi^2 n^2 \mathfrak{L}^2}}{R} = \frac{V_{eff}}{V'_{eff}},$$

d'où

$$\mathfrak{L} = \frac{1}{2\pi n}\left(R^2 \frac{V^2_{eff}}{V'^2_{eff}} - r^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Cette dernière disposition, comme la méthode de Lord Rayleigh, ramène la mesure de la self-induction à la comparaison avec une résistance.

Le conducteur sans réactance peut être constitué par un bain salin, les électrodes étant en même métal que celui du sel, par des fils tendus en zigzag ou par des lampes à incandescence. On obtient le maximum de précision et l'on atténue les erreurs de graduation en réglant le conducteur sans réactance de manière à obtenir les mêmes différences de potentiel, $V_{eff} = V'_{eff}$, et en cherchant à réaliser les déviations les plus grandes possibles. Mais avec les grandes impédances, ces conditions entraînent à des résistances sans réactance considérables.

La méthode de M. Joubert est la plus employée par les praticiens pour déterminer la self-induction de grands électro-aimants. On l'applique à ceux-ci en utilisant des alternateurs dont la courbe du courant se rapproche autant que possible de la forme sinusoïdale. Il va sans dire que, dans ce cas, le résultat ne donne qu'une valeur moyenne et assez grossière de la self-induction qui, pour un électro-aimant traversé par un courant périodique de grande intensité, est essentiellement variable. On adopte, pour effectuer la mesure, des courants dont l'intensité efficace est aussi voisine que possible de celle des courants de régime que l'électro-aimant doit supporter.

Comparaison d'une self-induction et d'une capacité. Méthodes de M. Pirani, de MM. Vaschy et de la Touanne, de M. Sumpner et de M. Kempe.— L'annulation des effets de la self-induction par ceux

d'une capacité a conduit aux méthodes les plus employées dans les laboratoires et les plus commodes pour la mesure de la self-induction des bobines sans fer et des petits électro-aimants. Le principe de ces méthodes est le suivant. Un condensateur de capacité c, shunté par une résistance R, se comporte dans un circuit parcouru par des courants variables comme une bobine de résistance R et de self-induction $-cR^2$ (1).

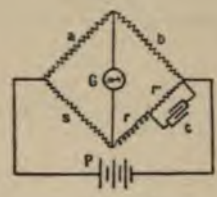


Fig. 143.

Un pont de Wheatstone comprend trois branches sans réactance a, b, s. Dans la quatrième branche, on dispose la bobine r, dont on cherche la self-induction £, en série avec une résistance r' sur laquelle on dérive une capacité c. On commence par équilibrer les côtés du pont pour le régime permanent. On cherche ensuite l'équilibre dans le régime variable, en modifiant les points de raccordement du condensateur avec le conducteur sans réactance. Soit R la résistance comprise entre les armatures lorsque le galvanomètre reste au repos, tant à l'ouverture qu'à la fermeture du circuit de la pile. On a alors

$$£ = cR^2;$$

c doit être exprimé en farads et R en ohms pour obtenir £ en henrys.

La méthode précédente proposée par M. Pirani a été modifiée par MM. Vaschy et de la Touanne de la manière suivante, pour le cas où il n'est pas possible de régler les résistances de manière à obtenir l'équilibre dans le régime variable. On règle l'équilibre permanent, puis on observe la déviation δ due à l'extra-courant de la bobine seule, le condensateur étant enlevé. On répète l'expérience avec le condensateur mis en dérivation sur une

(1) Eric Gerard, *Leçons sur l'Électricité*, 4e édition, § 197.

fraction R de la résistance du côté du pont dans lequel est intercalée la bobine essayée, fig. 144; on obtient une déviation δ'. Il est facile de voir que

$$\frac{\mathfrak{L}}{c\,R^2} = \frac{\delta}{\delta - \delta'}.$$

Dans la méthode proposée par M. Sumpner, le condensateur est placé dans le côté du pont conjugué par rapport à la bobine que

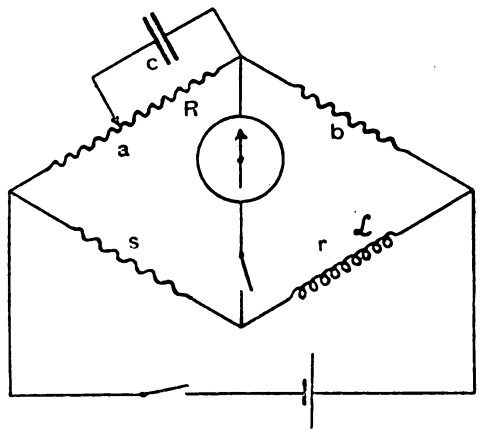


Fig. 144.

l'on mesure, fig. 144. Lorsque l'équilibre est établi dans le régime permanent et dans le régime variable, on a

$$\mathfrak{L}a = r\,c\,R^2,$$

d'où

$$\mathfrak{L} = \frac{r}{a}\,c\,R^2.$$

Ce procédé permet, comme on le voit, de mesurer des self-inductions très variables avec un condensateur de capacité donnée.

Les méthodes précédentes donnent souvent lieu à quelque incertitude avec les électro-aimants, parce que la désaimantation du noyau occasionne des oscillations du galvanomètre autour de la position d'équilibre. M. Kempe obvie à cet inconvénient en faisant deux expériences distinctes. A cet effet, on règle l'équilibre dans le régime permanent avec l'électro-aimant de résistance r, fig. 145; lors de l'ouverture ou de la fermeture de la clef de la pile, le galvanomètre est traversé par un extra-courant déterminant une élongation δ.

On substitue ensuite à l'électro-aimant le condensateur dérivé sur une résistance R et l'on remplace r_1 par une résistance r_2 telle que

$$r_2 + R = r_1 + r.$$

Si l'élongation δ' due à la décharge du condensateur est voisine de δ, on a

$$\frac{\mathfrak{L}}{c\,R^2} = \frac{\delta}{\delta'}.$$

Dans les méthodes de M. Pirani et de M. Sumpner, l'équilibre dans le régime permanent est réalisé au moyen d'une résistance à curseur, insérée dans l'une des branches du pont. Si l'on ne peut régler la résistance dérivée sur le condensateur, de manière à obtenir l'annulation de l'élongation dans le galvanomètre, on procède par interpolation.

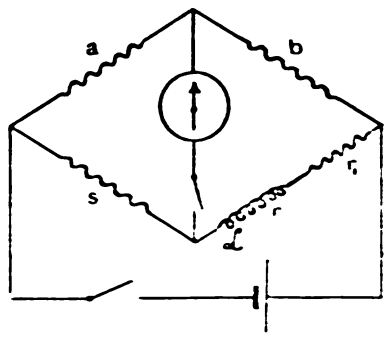


Fig. 145.

L'adjonction du commutateur de MM. Ayrton et Perry à ces dispositifs accroît notablement la sensibilité, puisque cet appareil remplace les élongations balistiques par des déviations permanentes.

Comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle avec un coefficient de self-induction. Méthode de Maxwell. — Considérons une bobine d'induction dont un des circuits possède une résistance r et une self-induction $\mathfrak{L}$, déterminée au préalable par l'une des méthodes précédentes. On forme un pont de Wheatstone à l'aide de résistances a, b, c, r, qu'on règle de manière à obtenir l'équilibre

permanent, fig. 146. On cherche ensuite à établir l'équilibre dans le régime variable en opposant le flux d'induction mutuelle de la bobine au flux de self-induction du premier circuit. En appelant $\mathfrak{M}$ l'inductance mutuelle des deux enroulements et I le courant permanent

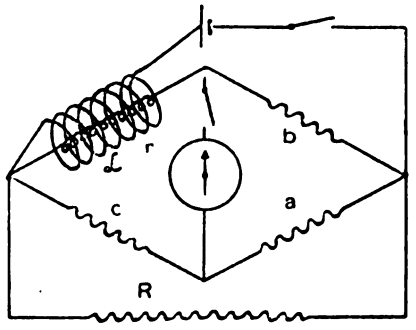


Fig. 146.

qui parcourt la bobine inductrice, le flux d'électricité dû à l'induction mutuelle est égal au rapport de $\mathfrak{M}I$ à la résistance du circuit dans lequel est inséré l'enroulement r. Le flux d'électricité dû à la self-induction est égal au quotient de $\mathfrak{L}I'$ par la même résistance, I' désignant le courant permanent qui traverse r.

Lorsque le galvanomètre n'accuse plus aucune élongation dans le régime variable, on a

$$\mathfrak{M}\, I = \mathfrak{L}\, I',$$

d'où

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{L}\,\frac{I'}{I}. \quad (1)$$

Mais

$$I' = I\,\frac{a+c}{a+c+r+b} = I\,\frac{c}{c+r},$$

par suite

$$\mathfrak{M} = \frac{\mathfrak{L}}{\left(1+\frac{r}{c}\right)}.$$

Le réglage de l'équilibre dans le régime variable dérègle le

régime permanent ; cette méthode exige donc des tâtonnements assez longs pour arriver à satisfaire aux deux conditions.

Pour éviter ces tâtonnements, on dérive sur la diagonale de la pile une résistance R qui ne trouble en rien l'équilibre dans le régime permanent et l'on gradue cette résistance jusqu'à l'obtention de l'équilibre dans le régime variable, fig. 146.

On a alors

$$\frac{I'}{I} = \frac{\frac{R(a+c)}{R+a+c}}{\frac{R(a+c)}{R+a+c} + r + b}.$$

Remplaçant dans (1) et introduisant la condition $ar = bc$, on trouve

$$\mathfrak{M} = \frac{\mathfrak{L}}{\left(1 + \frac{rR + bc + cr}{Rc}\right)}.$$

Ces deux dispositifs entraînent la condition $\mathfrak{L} > \mathfrak{M}$, attendu que $I > I'$. M. Brillouin a suggéré de mettre l'enroulement inducteur de la bobine dans la branche R au lieu de le disposer dans la diagonale de la pile. On a alors, en appelant R′ la résistance totale du shunt comprenant cette bobine,

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{L}\frac{R'}{r+b}.$$

Ces méthodes permettent l'emploi du commutateur rotatif de MM. Ayrton et Perry pour accroître la sensibilité.

Comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle et d'une capacité. Méthodes de comparaison et de réduction à zéro de M. Carey-Foster. — Le flux d'électricité $\frac{\mathfrak{M} I}{z}$, produit par un courant inducteur I dans un circuit induit de résistance z, peut être mesuré par l'élongation x d'un galvanomètre balistique

$$\frac{\mathfrak{M} I}{z} = \frac{x}{K}.$$

Si l'on charge un condensateur étalon de capacité c, en reliant ses armatures aux extrémités d'une résistance z' parcourue par le

même courant I, la décharge dans le galvanomètre occasionne une élongation α' telle que

$$c\,\mathrm{I}\,\rho' = \frac{\alpha'}{\mathrm{K}}.$$

On déduit de là

$$\mathfrak{M} = c\,\rho\,\rho'\,\frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Il est facile de voir que cette mesure est d'autant plus précise que α et α' sont plus grands et plus voisins.

M. Carey-Foster a basé sur ce principe une méthode de réduction à zéro en utilisant la disposition qu'indique la fig. 147, et qui permet d'équilibrer les effets des deux flux électriques sur le

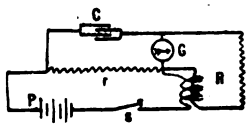


Fig. 147.

galvanomètre. Le condensateur C est dérivé sur une boîte de résistance r, mise en circuit avec une pile et la bobine primaire. Soit R la résistance totale de la bobine secondaire et d'une boîte de résistance en série avec elle.

En appelant e la force électromotrice de la pile et r' les résistances du circuit de la pile autres que r, on a, pour la valeur du courant permanent,

$$\mathrm{I} = \frac{e}{r + r'}. \qquad (1)$$

Désignons par £ la self-induction de la bobine induite, par $£_g$ celle du galvanomètre et par i, i', i'' les valeurs des courants qui, à un moment quelconque de la période variable, circulent dans la bobine inductrice, dans la bobine induite et dans le galvanomètre.

La seconde loi de Kirchhoff, appliquée à cet instant au circuit de la bobine induite et du galvanomètre, donne

$$\mathrm{R}\,i' + g\,i'' = -£\,\frac{di'}{dt} - \mathfrak{M}\,\frac{di}{dt} - £_g\,\frac{di''}{dt}.$$

Si l'on multiplie les deux membres par dt et qu'on intègre entre les limites de la période variable, en remarquant que les courants i' et i'' sont nuls à ces époques et que i varie de I à o, on a

$$Rq' + g q'' = \mathfrak{M} I, \qquad (2)$$

où q' et q'' représentent les flux d'électricité correspondant aux courants i' et i''.

Or, la différence entre les flux q' et q'' constitue précisément la charge du condensateur, égale d'autre part à crI ;

$$c r I = q' - q'', \qquad (3)$$

En éliminant q' entre (2) et (3), il vient

$$q'' = \frac{I(\mathfrak{M} - cRr)}{g + R}.$$

On voit que l'élongation du galvanomètre est nulle pour

$$\mathfrak{M} = cRr. \qquad (4)$$

Afin de déterminer les meilleures conditions de l'expérience, remplaçons I par sa valeur (1) ; on a

$$q'' = \frac{e(\mathfrak{M} - cRr)}{(r + r')(g + R)} = \frac{e(\mathfrak{M} - cRr)}{\Delta}.$$

Le numérateur est nécessairement une quantité très faible et l'on peut considérer l'élongation comme maxima pour les valeurs de r et R qui rendent le dénominateur minimum.

Égalons à zéro la dérivée de ce dénominateur par rapport à r

$$\frac{d\Delta}{dr} = (g + R) + (r + r')\frac{dR}{dr} = o. \qquad (5)$$

On tire d'autre part de (4)

$$R + r\frac{dR}{dr} = o. \qquad (6)$$

En eliminant $\frac{dR}{dr}$ entre les équations (5) et (6), on trouve le rapport $\frac{R}{r}$ qui procure le maximum de sensibilité

$$\frac{R}{r} = \frac{g + R}{r + r'} = \frac{g}{r'}.$$

La méthode de réduction à zéro présente l'avantage de permettre l'emploi d'un galvanoscope très sensible. D'autre part, elle a l'inconvénient, lorsqu'on mesure les bobines d'induction à noyau de fer, de donner lieu à une inexactitude résultant de l'inégalité de durée de la décharge du condensateur et de la désaimantation du noyau. Il en résulte des oscillations du galvanomètre autour du zéro. A ce point de vue, la méthode de comparaison simple est plus précise.

MESURES MAGNÉTIQUES

Chapitre XIX.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHAMPS MAGNÉTIQUES.

Dêtermination de l'intensité horizontale du champ terrestre. Méthode du magnétomètre de Gauss. — Un barreau aimanté droit est suspendu horizontalement, dans une cage fermée par une glace, à l'aide d'un fil ou d'un faisceau de fils de cocon assez long pour ne pas développer de couple de torsion appréciable (fig. 148). Un miroir est fixé sur l'axe de suspension, afin de permettre d'observer les déviations sur une échelle. On fait osciller l'aimant sans lui communiquer de mouvement pendulaire en approchant de la boîte, suivant la direction est-ouest passant par le centre de l'aimant, un second barreau. On détermine ainsi une déviation d'environ 3°, puis on retire le barreau auxiliaire et l'on mesure la durée de la période. Pour cela, un observateur note les passages de l'aimant et donne un signal, en prononçant le mot top par exemple, après chaque dizaine d'oscillations complètes, pendant qu'un second observateur lit les temps correspondants sur un chronomètre marquant le cinquième de seconde. On déduit de ces observations la durée d'une oscillation complète.

On sait que, si l'on fait osciller dans le champ magnétique terrestre, suivant l'horizontale, un barreau suspendu par un fil

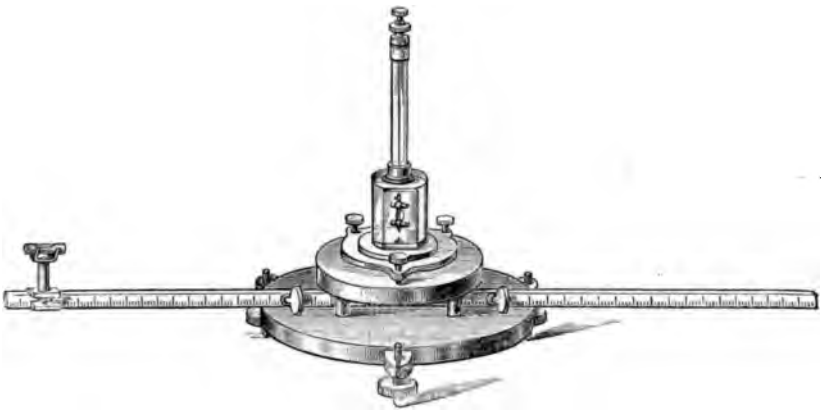


Fig. 148.

sans réaction de torsion sensible, la durée d'une oscillation complète, pour une amplitude suffisamment faible, est

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\mathcal{M}\,\mathcal{H}}},$$

K représentant le moment d'inertie du barreau, $\mathcal{M}$ son moment magnétique et $\mathcal{H}$ la composante horizontale du champ terrestre.

On tire de là

$$\mathcal{M}\,\mathcal{H} = \frac{4\,\pi^2\,K}{t^2}. \qquad (1)$$

Le moment d'inertie de l'aimant est calculé d'après le poids et les dimensions de celui-ci.

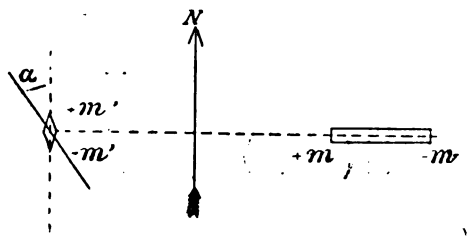


Fig. 149.

Après l'expérience d'oscillation, on effectue un essai de déviation en posant le barreau sur une règle divisée horizontale, fig. 149, normalement au méridien magnétique, et en suspendant à une certaine distance, sur le prolongement de l'axe du barreau, une aiguille aimantée de petites dimensions.

Soient $2\,l$, la distance des pôles du barreau ; $2\,l'$, celle des pôles de l'aiguille ; a, la distance du centre de l'aimant à celui de l'aiguille ; $+\,m$ et $-\,m$, les pôles de l'aimant ; $+\,m'$ et $-\,m'$, les pôles de l'aiguille.

L'aiguille mobile, sollicitée d'une part par le magnétisme terrestre, d'autre part par l'aimant, prend une position d'équilibre correspondant à un angle α entre son axe et le méridien magnétique. Vu les petites dimensions de l'aiguille, on peut admettre que les forces exercées sur ses pôles par ceux de l'aimant se réduisent à un couple.

Le couple terrestre a pour expression

$$c = \mathcal{M}' \mathcal{H} \sin \alpha.$$

Le couple dû au barreau est, en appelant F les forces que celui-ci développe sur les pôles de l'aiguille,

$$c' = 2\,F\,l' \cos \alpha.$$

Or, en vertu de la loi de Coulomb,

$$F = \frac{mm'}{(a-l)^2} - \frac{mm'}{(a+l)^2} = mm' \frac{4\,a\,l}{(a^2-l^2)^2};$$

par suite

$$c' = 2l'\,mm' \frac{4\,a\,l \cos \alpha}{(a^2-l^2)^2} = \mathcal{M}\mathcal{M}' \frac{a \cos \alpha}{(a^2-l^2)^2}.$$

La condition d'équilibre est

$$\mathcal{M}' \mathcal{H} \sin \alpha = 2\,\mathcal{M}\mathcal{M}' \frac{a \cos \alpha}{(a^2-l^2)^2},$$

d'où

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}} \left(1 - \frac{l^2}{a^2}\right)^{-2} = \frac{a^3 \operatorname{tang} \alpha}{2}.$$

Mais

$$\left(1 - \frac{l^2}{a^2}\right)^{-2} = 1 + 2\frac{l^2}{a^2} + 3\frac{l^4}{a^4} + \ldots;$$

S l est suffisamment petit, on peut négliger les puissances de $\frac{l}{a}$ supérieures à la seconde, et écrire

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}}\left(1+2\frac{l^2}{a^2}\right)=\frac{a^3\,\mathrm{tang}\,\alpha}{2}. \qquad (2)$$

On ne connaît pas, en général, la distance réelle l des pôles. On peut éliminer cet élément en renouvelant l'expérience de déviation pour un nouvel écartement a' de l'aiguille.

On obtient un angle de déviation α' tel que

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}}\left(1+2\frac{l^2}{a'^2}\right)=\frac{a'^3\,\mathrm{tang}\,\alpha'}{2}, \qquad (3)$$

d'où en soustrayant (3) de (2) après avoir multiplié (2) par a^2 et (3) par a'^2,

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}}=\frac{a^3\,\mathrm{tang}\,\alpha-a'^3\,\mathrm{tang}\,\alpha'}{2(a^2-a'^2)}. \qquad (4)$$

Les équations (1) et (4) permettent de déterminer séparément, le moment magnétique de l'aimant et l'intensité horizontale du champ magnétique terrestre.

Lorsqu'on cherche à atteindre une haute précision dans l'estimation du rapport $\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}}$, un grand nombre de corrections sont nécessaires.

Tout d'abord, la formule (4) montre que ce rapport est fortement influencé par une erreur commise dans la détermination de a et de a'.

Pour éliminer l'erreur provenant d'une excentricité de l'axe du magnétomètre, par rapport à l'axe de suspension de l'aiguille, on répète l'expérience de déviation, en plaçant l'aimant déviant dans des positions symétriques de part et d'autre de l'aiguille déviée, et l'on prend des moyennes. Pour corriger l'erreur qui peut résulter d'une excentricité du centre magnétique de l'aimant, on retourne le barreau déviant bout pour bout dans chacune de ses positions et l'on adopte la moyenne des lectures.

Les déviations doivent être aussi grandes que possible, sans que toutefois a' devienne inférieur à $6l$. Le rapport le plus favorable de a et a' est compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{3}{4}$.

Pour estimer l'influence de la température sur le moment magnétique du barreau, on répète l'expérience de déviation après avoir placé l'aimant dans un bain chauffé à une température connue.

La correction pour la torsion des fils de suspension s'effectue comme dans le cas des galvanomètres.

Il faut avoir égard à l'altération que subit le moment du barreau par l'action du magnétisme terrestre, qui tend à accroître le moment de l'aimant lorsque, dans l'expérience d'oscillation, le barreau se déplace dans le voisinage du méridien. On peut, dans l'expérience de déviation, donner au barreau la même intensité d'aimantation que dans l'expérience d'oscillation, en le disposant dans une longue bobine traversée par un courant capable de produire un champ de même intensité que le champ terrestre. L'effet direct de ce courant sur l'aiguille mobile est compensé en plaçant une bobine semblable, exerçant un effet antagoniste, de l'autre côté de l'aiguille.

Enfin, on doit tenir compte des variations diurnes du magnétisme terrestre, indiquées dans les tables magnétiques.

Il va sans dire que les observations précises doivent se faire dans des locaux dépourvus de toute matière magnétique.

Si l'on veut comparer les valeurs de l'intensité horizontale en différents points, il suffit de répéter l'expérience d'oscillation aux points considérés ; on a, en désignant par t et t', les durées d'oscillation correspondant à des intensités $\mathfrak{H}$ et $\mathfrak{H}'$,

$$\frac{\mathfrak{H}}{\mathfrak{H}'} = \frac{t'^2}{t^2}.$$

Inclinomètre de Weber. — La détermination de l'intensité horizontale du champ terrestre peut être faite à l'aide de l'inclinomètre de Weber. Cet appareil consiste en un cadre circulaire M N, entouré d'un grand nombre de spires de fil fin et de dimensions exactement connues. Le cadre est mobile autour d'un diamètre $o\ o'$ et des arrêts limitent sa révolution à 180° ; son enroulement est relié à un galvanomètre balistique. En plaçant le cadre dans un plan vertical, normal au méridien magnétique, et en le faisant tourner de 180°, la quantité d'électricité induite par le magnétisme terrestre donne la mesure de l'intensité horizontale.

Soient R la résistance du circuit en ohms, n, le nombre de spires de la bobine, a. la surface moyenne des spires. La variation du

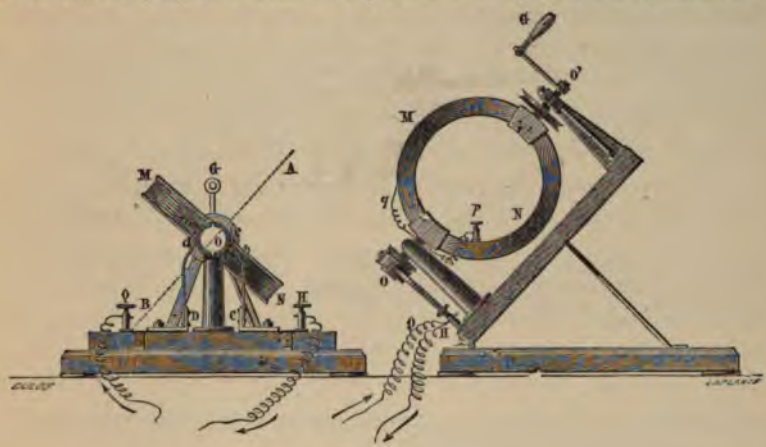


Fig. 150.

flux est $2\,\mathfrak{H}\,a\,n$ et la quantité d'électricité induite q, exprimée en coulombs, est donnée par la formule

$$q \times 10^{-1} = \frac{2\,\mathfrak{H}\,a\,n}{R \times 10^{9}}. \qquad (1)$$

En appelant α l'élongation du galvanomètre et K sa constante balistique, il vient

$$q = \frac{\alpha}{K},$$

d'où

$$\mathfrak{H} = \frac{10^{8}\,\alpha\,R}{2\,K\,an}.$$

Il faut que la durée du mouvement du cadre soit très courte par rapport à la période d'oscillation du galvanomètre. Si celui-ci est à aimant fixe, il faut déterminer la correction pour l'amortissement. On diminue l'importance de cette correction en introduisant une grande résistance dans le circuit.

Pour éviter cette correction, on peut utiliser la méthode suivante. On insère dans le circuit de l'inclinomètre et du galvanomètre une petite bobine enroulée vers le milieu d'un long solénoïde. On fait une seconde expérience en envoyant dans ce dernier un courant de

i ampères; on y développe ainsi un flux de force magnétique représenté par

$$\mathfrak{N} = 4\pi n_1 i s \times 10^{-1},$$

n_1 étant le nombre de spires par centimètre et s la section moyenne en cm². Si la petite bobine présente n' spires, elle est traversée pendant la période variable par un flux d'électricité

$$q' \times 10^{-1} = \frac{\alpha'}{K} \times 10^{-1} = \frac{4\pi n_1 s n' i \times 10^{-1}}{R \times 10^9}. \quad (2)$$

L'amortissement du galvanomètre est le même dans les deux expériences. On a donc, en comparant (1) et (2),

$$\mathfrak{H} = \frac{\alpha}{\alpha'} \frac{\pi n_1 s n' i}{5 a n}. \quad (3)$$

L'intensité i du courant qui traverse le solénoïde est mesurée par un ampèremètre.

Avec les galvanomètres à aimant mobile, dont l'amortissement est peu influencé par la résistance du circuit, on peut éliminer K en déchargeant dans le galvanomètre un condensateur de capacité connue, c microfarads, chargé à l'aide d'une pile étalon ayant une force électromotrice de e volts.

On a

$$q'' \times 10^{-1} = \frac{\alpha''}{K} \times 10^{-1} = c e \times 10^{-1},$$

d'où

$$\mathfrak{H} = 50 \frac{R c e}{a n} \frac{\alpha}{\alpha''}. \quad (4)$$

Si l'on prend la dérivée logarithmique des expressions (3) et (4), on voit que l'erreur relative limite commise sur $\mathfrak{H}$ est la somme des erreurs commises sur les diverses quantités qui entrent dans les seconds membres. On se placera dans les conditions les plus favorables, au point de vue des lectures, en cherchant à obtenir les élongations les plus grandes et les plus voisines possible.

Mesure de l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer d'une dynamo. Méthode par induction. Méthode basée sur le phénomène de Hall. — La méthode basée sur l'induction permet de mesurer l'intensité d'un champ très resserré, tel que celui que présente

l'entrefer des dynamos, car il est toujours possible d'introduire dans un champ semblable une petite bobine aplatie, reliée à un galvanomètre. On compose cette bobine de spires allongées, agglutinées par la gomme laque, comme dans les bobines des galvanomètres Deprez et d'Arsonval ; pour éviter l'érosion de l'isolant par le frottement, on peut enfermer la bobine entre des joues de mica. En retirant vivement la bobine, de manière à l'amener dans une position telle que le flux de force magnétique qui la traverse soit négligeable, on produit dans le circuit un déplacement d'électricité mesuré par l'élongation du galvanomètre.

Pour déterminer la constante de celui-ci, on peut se servir d'un inclinomètre intercalé dans le circuit ou du solénoïde dont il est question plus haut.

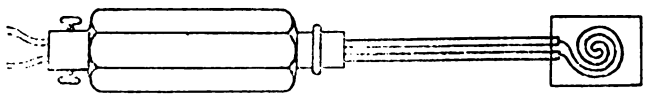


Fig. 151.

M. Leduc a indiqué l'accroissement de la résistance électrique du bismuth placé dans un champ magnétique comme un moyen de mesurer l'intensité de celui-ci.

Dans l'appareil construit par MM. Hartmann et Braun pour cette détermination, un fil mince de bismuth, d'une résistance d'environ 10 ohms, est contourné en double spirale, pour annuler la self-induction, et logé entre deux lamelles de mica de manière que l'épaisseur ne dépasse pas 0,5 mm. Ce fil est raccordé à deux bandes de cuivre protégées par une gaîne d'ébonite. La spirale peut être introduite dans un entrefer très exigu. On détermine rapidement sa résistance avant et après l'introduction, à l'aide d'un pont à téléphone de Kohlrausch. L'accroissement de résistance n'est pas tout à fait proportionnel à l'intensité du champ. Il faut graduer l'appareil expérimentalement ou se servir d'une courbe empirique livrée avec l'instrument par le constructeur.

Chapitre XX.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE ET DE L'HYSTÉRÉSIS.

Généralités. — L'essai des fers, fontes et aciers employés pour la construction des dynamos et des transformateurs est d'une importance capitale.

Dans la construction des inducteurs d'une dynamo, on peut, à la rigueur, corriger un défaut de perméabilité par un excès de cuivre, mais, dans les transformateurs, où toute la place libre est occupée par le cuivre, une insuffisance magnétique du noyau est sans remède. Il faut, pour le fer des transformateurs, exiger, non la plus grande perméabilité, mais la moindre hystérésis, deux qualités qui ne sont pas tout à fait connexes. C'est ainsi que certains fers homogènes obtenus à l'état de fusion sont plus perméables que des fers puddlés, mais donnent plus de perte par hystérésis. On exige maintenant des fabricants de fer qu'ils livrent des tôles n'entraînant que 0,84 watt de perte par hystérésis par kilogramme, avec une induction magnétique maxima de 2 500 C. G. S. et une fréquence de 100 périodes par seconde. L'analyse chimique est loin d'être suffisante pour fixer sur la qualité du fer; l'état physique joue un rôle très important, aussi l'essai magnétique est-il nécessaire.

On a remarqué, que les noyaux des transformateurs occasionnent une perte par hystérésis croissant avec la durée de l'emploi; cette augmentation peut atteindre 25 pour 100 si les noyaux ont été surchauffés par les variations magnétiques.

Pour l'essai du métal destiné aux inducteurs des dynamos à courant continu, on emploie des méthodes dans lesquelles les éprouvettes sont utilisées à l'état de barres ou de fils; l'essai de perméabilité est ici seul important. S'il s'agit de noyaux de transformateurs, d'induits de dynamos ou d'inducteurs de moteurs polyphasés, il est indipensable d'essayer les éprouvettes sous forme de bandes assemblées en paquets et de les soumettre à des forces magnétisantes variant de la même manière que dans leurs applications, afin de déterminer la perte par hystérésis et par courants de Foucault.

Méthode magnétométrique de M. Ewing pour déterminer la perméabilité. — La méthode de M. Ewing pour la mesure de la perméabilité d'un échantillon de fer ou d'acier est basée sur l'action d'un long barreau vertical, aimanté par un solénoïde, sur un petit magnétomètre tel que celui qui a été décrit à propos des expériences de Gauss. Tous les fils de connexion sont tordus pour éviter l'action des courants sur l'aiguille mobile.

On sait que, si la longueur du noyau et de la bobine magnétisante est au moins égale à 500 fois leur diamètre, on peut admettre que le flux est constant dans la région médiane du barreau. En désignant par $\mathfrak{I}$ l'intensité d'aimantation, par $\mathfrak{H}$ la force magnétisante représentée par $4\pi \times 10^{-1}$ fois le nombre d'ampères-tours de la bobine par centimètre, on a, pour la perméabilité,

$$\mu = \frac{\mathfrak{H} + 4\pi\,\mathfrak{I}}{\mathfrak{H}}. \qquad (1)$$

La détermination de $\mathfrak{I}$ en fonction de $\mathfrak{H}$ permet donc de calculer les valeurs correspondantes de μ. Le courant qui parcourt la bobine magnétisante B est fourni par une batterie d'accumulateurs e, mesuré par un ampèremètre g et réglé par un rhéostat r.

Ce rhéostat permet de faire varier le courant par degrés insen-

sibles. Il est formé par un vase en poterie rempli d'une solution de sulfate zincique, dans laquelle plongent deux électrodes en zinc fixes, *a* et *b*, reliées aux accumulateurs, et deux électrodes mobiles, *c* et *d*, portées par un tambour pouvant tourner autour d'un axe vertical. Les électrodes mobiles sont reliées au circuit par deux contacts à bagues. En tournant le tambour, on intervertit le courant et l'on fait passer son intensité par toutes les valeurs comprises entre un maximum positif et un maximum négatif.

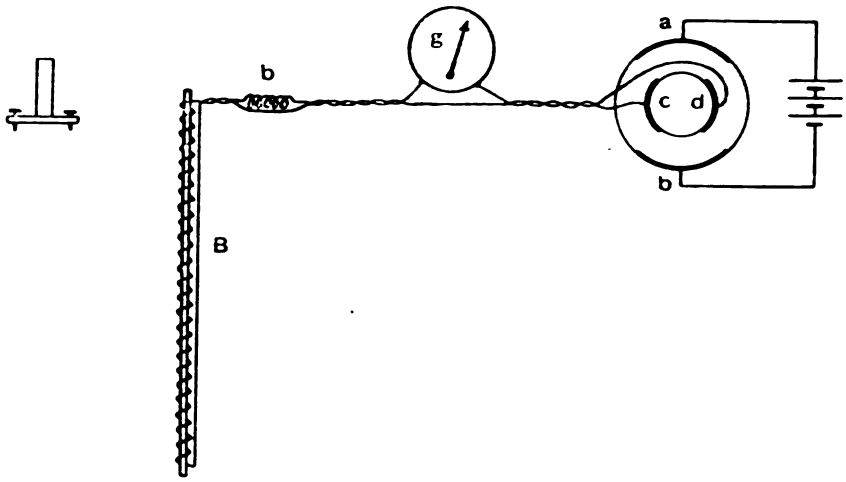


Fig. 152.

L'action de la bobine B sur le magnétomètre est équilibrée par une bobine compensatrice *b*, agissant également, mais en sens inverse. L'effet assez minime de la composante verticale du magnétisme terrestre sur le barreau, qui tend à provoquer une légère aimantation de celui-ci, peut, si la précision des mesures l'exige, être annulé par l'action d'une bobine supplémentaire enroulée autour de B et traversée par un courant de nature à provoquer un champ dont l'intensité est égale à celle de cette composante, mais qui est dirigé en sens contraire.

Avant toute mesure, il convient d'amener l'éprouvette à l'état neutre. Pour cela, on fait passer dans la bobine B des courants alternés d'amplitudes décroissantes, obtenus en réduisant progressivement le nombre des couples secondaires ou en insérant des résistances croissantes dans le circuit.

Le magnétomètre est placé à une distance convenable du solénoïde, de manière que la droite, de longueur a, menée normalement à l'éprouvette du centre de l'aimant mobile, soit dans la direction est-ouest. Le barreau est amené à une hauteur telle que, pour un courant donné, l'effet sur l'aiguille soit maximum, ce qui a lieu quand la normale susdite passe par le pôle supérieur de l'éprouvette. Appelons l la longueur de celle-ci, supposée assez grande par rapport à a. En désignant par s la section du barreau et par $\mathfrak{I}$ son intensité d'aimantation, la composante horizontale du champ qu'il produit à l'endroit de l'aiguille est

$$\mathfrak{H}_1 = \mathfrak{I} s \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{a^2 + l^2} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + l^2}} \right).$$

L'angle θ d'équilibre de l'aiguille est atteint, lorsque le couple $\mathfrak{H}_1 \mathfrak{A} \cos \theta$ équivaut au couple $\mathfrak{H}_2 \mathfrak{A} \sin \theta$; $\mathfrak{H}_2$ étant l'intensité horizontale du champ terrestre et $\mathfrak{A}$ le moment magnétique de l'aiguille.

En réduisant, il vient

$$\mathfrak{I} = \frac{a^2}{s} \frac{\mathfrak{H}_2 \operatorname{tang} \theta}{1 - \frac{a^3}{(a^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}}.$$

Si l est suffisamment grand par rapport à a, on peut écrire

$$\mathfrak{I} = \frac{a^2}{s} \mathfrak{H}_2 \operatorname{tang} \theta. \qquad (2)$$

L'équation (2) combinée à (1) permet de trouver les valeurs de μ correspondant aux diverses valeurs de la force magnétisante.

En faisant croître cette dernière par degrés, on peut tracer la courbe $\mathfrak{B} = f(\mathfrak{H})$ et déterminer, par la surface de cette courbe, la perte par hystérésis, pour un cycle parcouru lentement.

Cette méthode a l'inconvénient d'exiger la connaissance de la composante horizontale du magnétisme terrestre.

Méthode de M. Rowland basée sur l'induction. — Le barreau, dont la longueur équivaut à 500 diamètres au moins, est entouré de la bobine magnétisante M, parcourue par un courant qu'on

mesure à l'aide d'un ampèremètre *a*. Une bobine *s*, enroulée vers le milieu du barreau, est reliée au galvanomètre balistique G. Celui-ci peut être gradué au préalable au moyen d'un condensateur *c* et d'une pile étalon E qui permettent de déterminer la constante balistique K.

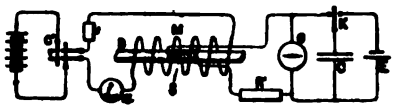


Fig. 153.

Lorsque l'instrument est du type Deprez et d'Arsonval, il faut, ou introduire une grande résistance dans son circuit pour rendre négligeable l'amortissement du cadre mobile par les courants induits, ou, de préférence, évaluer la constante balistique en se servant de la bobine magnétisante même, dont on connaît le flux pour un courant donné.

Un rhéostat, inséré dans le circuit de la batterie, sert à faire varier l'intensité du courant par degrés. On observe ainsi des impulsions successives au galvanomètre, qui permettent de calculer les accroissements progressifs du flux magnétique à travers le noyau. Appelons $\mathfrak{B}$ l'induction magnétique de celui-ci pour un courant i dans la bobine magnétisante et $\mathfrak{B}'$ la valeur correspondant à un courant i'; s, la section du noyau; n_1, le nombre de spires par unité de longueur de la bobine M; n, le nombre total de spires de la bobine; s et r la résistance du circuit du galvanomètre. La décharge due à une variation $(i - i')$ du courant est exprimée par

$$q = \frac{(\mathfrak{B} - \mathfrak{B}')\, ns}{r} = \frac{\alpha}{K}.$$

Cette méthode permet d'évaluer les valeurs successives de $\mathfrak{B}$, en fonction de la force magnétisante $4\pi n_1 i \times 10^{-1}$ et par suite les valeurs de la perméabilité

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{4\pi n_1 i \times 10^{-1}}.$$

La détermination des courbes d'aimantation par ce procédé est

moins exacte que par la méthode magnétométrique, car les points successifs étant obtenus par l'addition des valeurs déduites des élongations successives lues au galvanomètre, les erreurs commises s'ajoutent.

Il est possible d'éviter cette accumulation des erreurs, en enroulant la bobine S sur un tube de verre couvrant la bobine magnétisante. Il suffit de retirer vivement la bobine S, pour obtenir dans le galvanomètre une impulsion permettant de calculer le flux total produit par le noyau et la bobine magnétisante.

La méthode précédente exige des barreaux de très grande longueur pour rendre négligeable l'influence des extrémités. Pour éviter toute erreur, M. Rowland donne à l'éprouvette la forme d'un anneau, dont l'épaisseur est faible par rapport au diamètre. En entourant complètement un tel anneau d'une bobine magnétisante, on obtient à l'intérieur de celle-ci un champ constant d'intensité $\mathcal{H} = 4\pi\, n_1\, i$. Une bobine auxiliaire, enroulée autour de l'anneau et reliée à un galvanomètre balistique, permet de mesurer le flux à travers le noyau.

L'anneau est la forme la meilleure qu'on puisse donner aux éprouvettes, mais, par suite de la difficulté de l'obtenir, on préfère recourir à des barreaux droits.

Dans les expériences rigoureuses, il est nécessaire de faire une correction pour tenir compte de la différence entre le diamètre du noyau et celui de la bobine S. Lorsque celle-ci est enroulée directement sur le noyau, l'intervalle entre ce dernier et la bobine est, en effet, traversé par un flux magnétique égal à la valeur de la force magnétisante multipliée par la section de cet intervalle. La correction est minime, si le noyau est assez fort.

Méthode de M. Hopkinson basée sur l'induction. — M. Hopkinson a adopté le dispositif suivant, pour raccourcir la longueur de l'éprouvette. Le barreau dont il s'agit de mesurer la perméabilité est formé de deux tronçons c et c' juxtaposés ; il traverse une masse de fer forgé A, deux bobines magnétisantes B B et une petite bobine D reliée au galvanomètre balistique. Cette bobine D est sollicitée latéralement par une bande de caoutchouc, de sorte que, si l'on écarte légèrement les deux tronçons c et c', à l'aide des

poignées qui les terminent, la bobine D est tirée hors de l'appareil et traversée par un flux électrique en rapport avec l'induction magnétique du barreau.

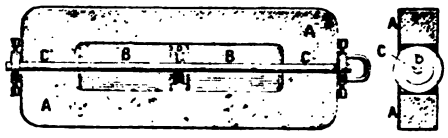


Fig. 154.

Le bloc de fer et le barreau constituent un circuit magnétique qui est le siége d'un flux produit par la force magnétomotrice $4\pi\, m\, i \times 10^{-1}$, m et i étant respectivement le nombre total de spires et le courant en ampères des bobines BB.

Soient $\mathfrak{N}$ le flux magnétique ; l la longueur, en cm, du barreau limitée par le vide du bloc A ; s, la section en cm² du barreau ; μ, la perméabilité de celui-ci ; l' cm, le parcours moyen des lignes de force magnétique dans la masse A ; s' cm² la section de celle-ci et μ' sa perméabilité. On a

$$4\pi\, m\, i \times 10^{-1} = \frac{\mathfrak{N}\, l}{\mu\, s} + \frac{\mathfrak{N}\, l}{\mu\, s'}.$$

On peut négliger le second terme, lorsque la section s' est suffisante et retenir simplement l'équation

$$4\pi\, mi \times 10^{-1} = \frac{\mathfrak{N} l}{\mu s}. \qquad (1)$$

n étant le nombre de spires de la bobine témoin, le flux électrique produit par le retrait de celle-ci est

$$\frac{\mathfrak{N} n}{R} = \frac{q}{K}. \qquad (2)$$

si R désigne la résistance du circuit contenant le galvanomètre balistique.

En faisant varier le courant magnétisant i, mesuré à l'aide d'un ampèremètre, on peut déduire des équations 1 et 2 les valeurs de la perméabilité et de l'induction magnétique correspondant à diverses valeurs de la force magnétisante.

On remarquera que la reluctance des joints des barreaux entr'eux et avec la masse de fer, ainsi que l'hystérésis de celle-ci, apportent quelques erreurs dans les résultats.

Méthode de M. Ewing fondée sur l'induction. — La séparation de l'éprouvette en deux parties entraîne des manœuvres assez difficiles. M. Ewing a suggéré une modification de la méthode de M. Rowland, qui permet d'éviter l'accumulation des erreurs, et qui s'applique à des éprouvettes en forme de barreaux allongés, d'anneaux ou de barreaux courts complétés par une masse de fer. Nous considérerons ce dernier cas, qui permet de procéder rapidement à l'essai des métaux destinés à la confection des carcasses des dynamos.

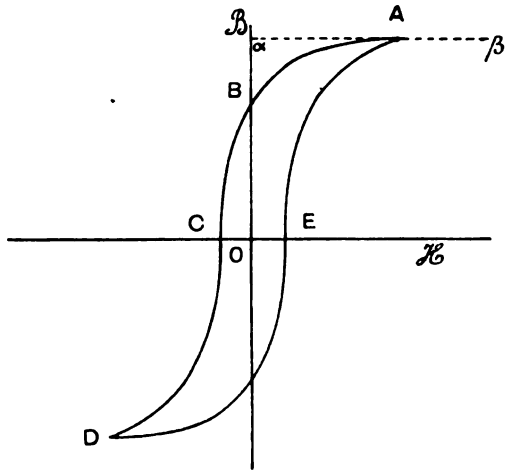


Fig. 155.

Dans la méthode de M. Rowland, on procède par accroissements progressifs de l'aimantation du barreau; dans celle de M. Ewing, on revient, après chaque observation, au point d'aimantation initiale A, voisin de la saturation, après avoir fait parcourir au barreau un cycle complet d'aimantation; de la sorte, on ramène chaque fois l'éprouvette dans les mêmes conditions magnétiques. Il suffit de déterminer la courbe A B C D, la courbe D E A est obtenue par symétrie, fig. 155.

Le courant magnétisant est fourni par une batterie d'accumulateurs et estimé par un ampèremètre *a*. La variation du flux magnétique est mesurée par l'induction qu'elle détermine dans une bobine *d* reliée à un galvanomètre balistique G. Celui-ci est gradué à l'aide du flux d'induction dû à un solénoïde très allongé *b*, autour duquel est enroulée une petite bobine *d*, insérée dans le circuit du galvanomètre.

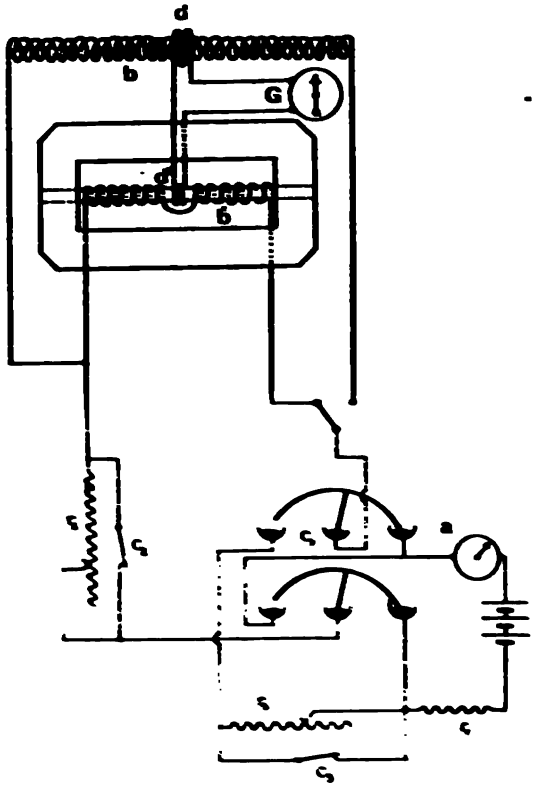


Fig. 156.

c_1 est un commutateur à 6 godets remplis de mercure ; un double cavalier basculant permet d'intervertir les communications entre la batterie et la bobine magnétisante *b* ; r_1 est une résistance convenablement graduée ; r_2 et r_3, des résistances réglables pouvant être mises en court-circuit par les clefs c_2 et c_3. Dans l'état des connexions indiqué par la fig. 156, le courant parcourt r_1, c_2,

b' et a. Appelons $+ I_m$ l'intensité de ce courant et supposons qu'elle soit capable de donner au barreau sa plus grande aimantation, correspondant au point A de la courbe du magnétisme, fig. 155. Ayant réglé la résistance r_2, on ouvre brusquement c_2. Le courant diminue et l'on observe au galvanomètre balistique une élongation qui permet de déterminer la diminution du flux magnétique. On revient alors à l'aimantation initiale A, après qu'on a fait parcourir au barreau un cycle complet; pour cela, on fait basculer le cavalier c_1 à gauche, puis à droite, après avoir refermé c_2, de manière à donner au courant magnétisant les valeurs successives $- I_m$ et $+ I_m$. En répétant ces opérations avec des valeurs croissantes de r_2, on obtient les points de la partie AB de la courbe du magnétisme.

Afin de trouver les points de la partie B D de la courbe, on procède comme suit. On maintient r_2 en court-circuit et l'on ouvre c_3, de manière à introduire r_3 en circuit, au moment où l'on bascule le cavalier à gauche. On peut ainsi donner au courant magnétisant toutes les valeurs comprises entre o et $- I_m$. Les élongations accusées par le galvanomètre balistique sont proportionnelles aux ordonnées de la courbe, comptées à partir d'une parallèle $\alpha\beta$ à l'axe des abcisses. Ce dernier peut être tracé lorsqu'on a déterminé les points symétriques A et D.

M. Ewing a remarqué qu'on dresse des courbes très régulières, particulièrement pour les valeurs faibles de l'aimantation, lorsqu'on commence par faire parcourir plusieurs cycles au barreau, en manœuvrant c_1 de manière à obtenir des courants $+ I_m$ et $- I_m$.

Méthodes basées sur la force portante. Appareils de M. Thompson et de M. Du Bois. — La force portante d'un barreau aimanté est exprimée, en dynes, en fonction de l'induction magnétique $\mathfrak{B}$ et de la section s, par la formule

$$p = \frac{\mathfrak{B}^2 s}{8\pi}.$$

Si p est donné en grammes et s en cm², on a donc

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi p \times 981}{\mathfrak{B}^2 s}}. \qquad (1)$$

Pour utiliser cette formule, il suffit de dresser verticalement l'appareil de M. Hopkinson et de séparer les deux tronçons du barreau en agissant sur l'un d'eux, glissant à frottement doux dans la masse de fer extérieure. La valeur de $\mathfrak{H}$ est égale à $4\pi n_1 i \times 10^{-1}$, n_1 étant le nombre de spires par centimètre de la bobine magnétisante.

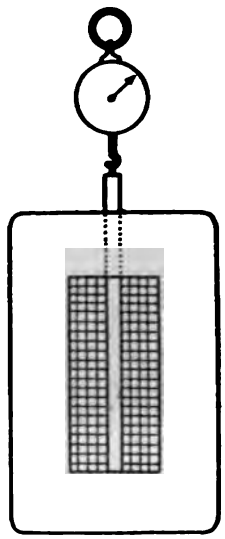


Fig. 157.

M. Sylvanus Thompson a donné à l'appareil la forme ci-contre. Le barreau éprouvette vient toucher le bloc de fer par son bout inférieur bien dressé et l'on tire sur le bout supérieur à l'aide d'une balance à ressort. Pour ne pas exercer de secousse capable de détacher prématurément le barreau, il convient, après avoir donné une certaine tension au ressort, de provoquer la séparation par une diminution progressive du courant magnétisant. Lorsque la section du barreau n'est pas supérieure au $^1/_{200}$ de celle du cadre, on peut négliger la reluctance de ce dernier et des contacts, pour les valeurs élevées de l'induction magnétique, comparables à celles qu'on atteint dans les inducteurs de dynamos.

On remarquera que, d'après la formule (1), l'erreur relative commise sur la valeur de la perméabilité n'est que la moitié de l'erreur résultant de la lecture de p.

M. Du Bois a réalisé une autre disposition, commode pour les mesures industrielles.

L'éprouvette T est glissée entre des pièces polaires PP′ en fer et entourée d'une bobine magnétisante B. Le circuit magnétique est complété par une armature massive AA pivotant sur des couteaux disposés de côté. Un contrepoids D équilibre le long bras du fléau. L'attraction magnétique qui tend à faire basculer le fléau vers la gauche est compensée par un poids mobile glissant le long d'une règle divisée. Le moment du poids est sensiblement proportionnel au carré de l'induction magnétique à travers le barreau. L'échelle est graduée empiriquement de manière qu'en multipliant la lecture par la racine carrée du poids employé, on obtienne la valeur de l'induction.

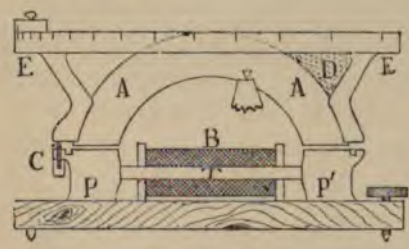


Fig. 158.

Pour corriger les erreurs dues à l'hystérésis des pièces polaires et de l'armature, on porte, dans le tracé de la courbe du magnétisme, les abcisses à partir d'un axe curviligne mené sur une feuille transparente fournie avec l'instrument.

Méthodes basées sur une mesure de champ magnétique. Dispositifs de M. Bruger et de MM. Koepsel et Kennely. — Des méthodes pratiques ont été suggérées pour déterminer rapidement la perméabilité d'un barreau inséré dans un circuit magnétique présentant un entrefer etroit. On peut, par exemple, comme M. Bruger, former un circuit magnétique à l'aide d'un barreau droit et d'un barreau en forme de C, en réservant un mince entrefer dans lequel on dispose une spirale de bismuth permettant de mesurer le champ produit dans cet espace par la bobine magnétisante qui entoure les noyaux. En graduant l'appareil avec un barreau type, on peut déduire.

des variations de la résistance du bismuth, la perméabilité des éprouvettes par rapport à celle du barreau étalon.

MM. Koepsel et Kennely évaluent l'intensité du champ dans un entrefer analogue, par le couple de torsion exercé sur une bobine semblable à celle du galvanomètre Deprez et d'Arsonval insérée dans cet entrefer et parcourue par un courant déterminé.

Perte par hystérésis dans les cycles parcourus rapidement. Méthode de M. Ewing. — Dans les méthodes précédentes, les cycles d'aimantation des barreaux essayés sont parcourus lentement. Or, lorsqu'une force magnétisante donnée est appliquée à un barreau, l'aimantation, après avoir acquis une certaine valeur, croît légèrement pendant plusieurs secondes, si l'on opère dans la période croissante du cycle, et décroît dans la période descendante. Il s'ensuit que, si la durée du cycle est de plusieurs secondes, la surface comprise entre la courbe montante et la courbe descendante du magnétisme est moindre que si le cycle est parcouru rapidement. Dans des cas extrêmes, les différences ont atteint jusqu'à 20 pour 100 de la perte totale due à l'hystérésis.

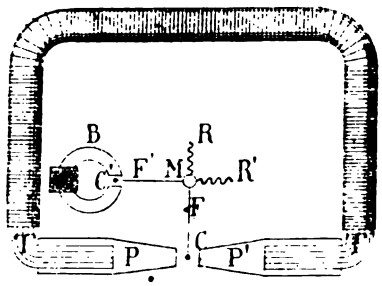


Fig. 159.

M. Ewing a suggéré une méthode graphique qui permet de relever les courbes du magnétisme correspondant à des cycles parcourus en une fraction de seconde. La fig. 159 indique le schéma de l'appareil dont la fig. 160 représente une vue d'ensemble. On constitue un circuit magnétique à l'aide du fer essayé, employé sous forme de bandes minces pour éviter les courants de Foucault, d'une culasse et de pièces polaires. Les noyaux sont entourés de

bobines magnétisantes. Entre les pièces polaires PP′ est tendu un fil *c* que parcourt un courant constant fourni par une pile. Le courant magnétisant traverse un fil *c′*, tendu dans une rainure creusée dans un tube en fer B, lequel est aimanté sous une intensité invariable par un courant independant.

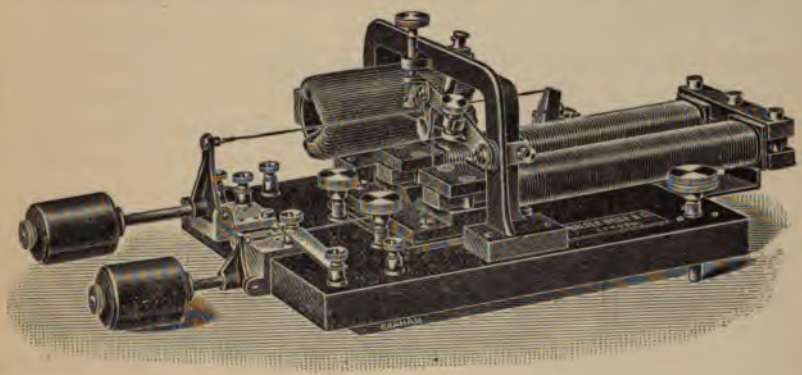


Fig. 160.

La variation du courant magnétisant, d'une part, et celle du flux magnétique produit dans le noyau essayé, d'autre part, modifient les forces électromagnétiques qui agissent sur les fils *c′* et *c*. Ce dernier est sollicité en raison de l'importance du flux magnétique, le premier en raison de l'intensité de la force magnétisante. Les deux déplacements qui ont lieu dans des directions normales communiquent une double rotation à un miroir M, relié aux conducteurs *cc′* à l'aide de fils F, F′, tendus par des ressorts R, R′.

Si l'on envoie un faisceau lumineux sur le miroir, le faisceau réfléchi décrit les courbes d'aimantation sur un écran. Ces courbes peuvent être enregistrées par la photographie. Le peu d'inertie des pièces mobiles permet de réduire la durée du cycle à $^1/_{20}$ de seconde.

Le courant magnétisant est gradué à l'aide du rhéostat liquide à rotation, décrit à propos de la méthode magnétométrique. En faisant tourner ce rhéostat à des vitesses variables, on peut étudier l'influence de la vitesse sur la perte par hystérésis.

Des expériences faites par d'autres méthodes ont montré que la perte par hystérésis reste constante lorsque la fréquence varie entre 20 et 150.

Méthode du wattmètre pour apprécier les pertes dans le fer des noyaux des transformateurs. — Cette méthode d'essai s'applique spécialement aux tôles employées dans la construction des noyaux des transformateurs, des induits des dynamos et, en général, de tous les électro-aimants soumis à des forces magnétisantes variables.

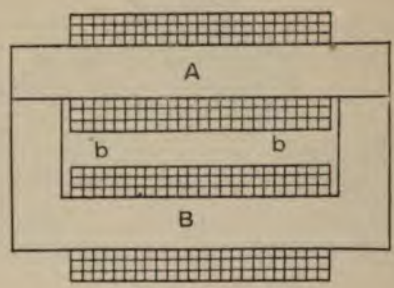


Fig. 161.

Un circuit magnétique est constitué au moyen d'un paquet de bandes minces A, d'un poids connu, débitées dans la tôle à essayer, et d'un autre paquet B formé de tôles découpées en U. Les bandes sont isolées au papier ou au vernis, comme dans les transformateurs. *bb* sont des bobines magnétisantes traversées par le courant périodique que fournit une machine donnant une courbe de courant sinusoïdale.

On estime la puissance dépensée dans les bobines à l'aide d'un wattmètre à circuits sans réactance, et l'on en déduit la perte par hystérésis et par courants de Foucault dans les tôles essayées. Pour cela, on calibre au préalable l'appareil en utilisant un paquet de tôles A de même fer que celui qui entre dans la constitution de B. La dépense observée au wattmètre représente les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans les noyaux et par effet Joule dans les bobines. La perte par effet Joule est très minime et peut être négligée pour les valeurs élevées de l'aimantation des noyaux. La perte par courants de Foucault est également assez faible lorsque les bandes de fer ont moins de 0,3 mm d'épaisseur. La dépense indiquée par le wattmètre pendant le tarage représente donc, pour la plus grande partie, la perte par

hystérésis. La reluctance magnétique des joints n'occasionne aucun supplément de perte, puisque l'hystérésis est nulle dans l'air; elle n'influence que le courant nécessaire pour obtenir l'induction magnétique voulue. Les pertes se répartissent proportionnellement aux poids. On peut donc conclure de cette première mesure la perte dans la partie B du circuit. En substituant ensuite à A le paquet de tôles à essayer, on obtient, par différence, les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans l'éprouvette.

La valeur de l'induction magnétique maxima à laquelle l'éprouvette est soumise se déduit de la valeur maxima du courant magnétisant.

Méthode directe de M. Ewing pour la mesure de l'hystérésis. — Un appareil simple et commode a été étudié par M. Ewing, en vue de permettre de déterminer rapidement la perte par hystérésis dans un faisceau de bandes de fer découpées dans les tôles servant à la construction des noyaux soumis à des aimantations variables. Cet appareil ramène la mesure du travail dû à l'hystérésis à celle

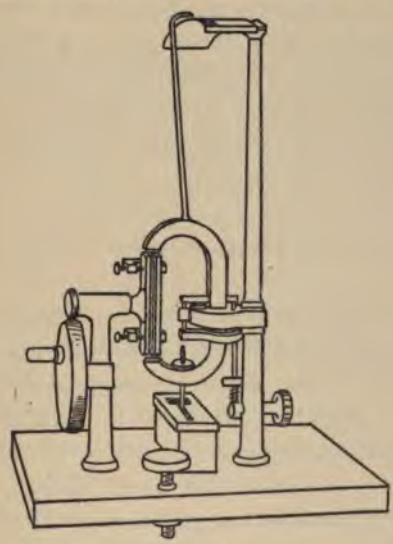


Fig. 162.

d'un couple. L'éprouvette consiste en un paquet de 6 à 8 tôles minces de 7,5 cm de long sur 1,65 de large, serrées dans un

support auquel on communique un mouvement de rotation par l'intermédiaire d'une manivelle et d'une poulie de friction. L'aimant qui provoque l'induction bascule sur des couteaux dont la ligne de contact passe par l'axe de rotation de l'éprouvette.

La réaction du fer soumis à l'induction magnétique, sur l'aimant qui détermine celle-ci, provoque un couple qui, multiplié par 2π, mesure le travail de l'hystérésis, de même que, dans un frein de Prony, le couple dû au poids résistant multiplié par l'écart angulaire correspondant à une révolution représente le travail des frottements.

Si la période d'oscillation de l'aimant est assez grande relativement à celle d'une révolution de l'éprouvette, la déviation lue sur la graduation est indépendante de la vitesse de rotation de l'appareil et elle sert de mesure au travail de l'hystérésis.

La vitesse de rotation ne doit pas toutefois devenir telle que les courants de Foucault dans l'appareil mobile exercent une réaction appréciable sur l'inducteur.

Un contrepoids réglable, fixé à la partie inférieure de l'aimant, permet d'obtenir une déviation convenable. Afin que le flux de force qui traverse les échantillons soumis à l'induction soit à peu près independant de la perméabilité de ceux-ci, on a soin de ménager de grands entrefers devant lesquels la résistance magnétique des éprouvettes est négligeable. L'aimant est proportionné de manière que l'induction magnétique soit voisine de 4 000 C. G. S. L'experience a prouve que le poids et l'epaisseur des échantillons ne demandent pas un ajustement précis, si la longueur des bandes est constante.

Chaque instrument est pourvu d'éprouvettes étalons et de tables donnant les pertes par hysteresis trouvees pour ceux-ci à l'aide d'une methode indirecte. En comparant la déviation donnée par l'etalon introduit dans l'appareil avec la deviation d'un échantillon essaye, on peut deduire par une proportion le travail par hystérésis de ce dernier, sous l'induction 4 000. Les pertes sous d'autres inductions seront les nombres proportionnels aux pertes fournies par l'etalon soumis aux mêmes inductions.

APPLICATIONS

Chapitre XXI.

RÉSISTANCE D'UN GALVANOMÈTRE.

Méthode des déviations réduites. — La résistance du cadre d'un galvanomètre peut être mesurée par l'une des méthodes exposées précédemment, par celle du pont de Wheatstone par exemple, qui

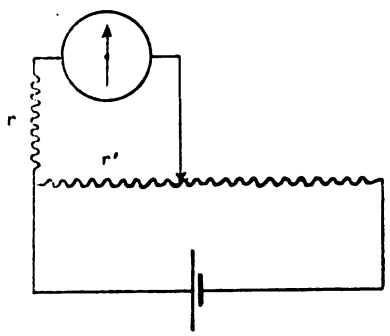


Fig. 163.

est susceptible d'une grande exactitude. On aura soin, si le galvanomètre à mesurer est très sensible, de caler l'équipage mobile pour ne pas détériorer l'appareil par l'action électromagnétique du

courant servant à l'essai. Lorsqu'on ne dispose pas d'un galvanomètre auxiliaire pour effectuer celui-ci, on a recours à des méthodes spéciales.

Dans la méthode des déviations réduites, on réalise un circuit à l'aide du galvanomètre, d'une boîte de résistance et d'une pile, shuntée au besoin, comme l'indique la fig. 163.

Si la résistance du shunt r' est assez faible pour que les variations de résistance dans la dérivation du galvanomètre n'apportent aucun changement dans la différence de potentiel V aux extrémités de ce shunt, on a, en bouchant toutes les résistances de la boîte r, de manière à obtenir la plus grande déviation possible,

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{V}{g}.$$

En débouchant une résistance r dans la caisse, il vient

$$i' = \frac{\alpha'}{k} = \frac{V}{r+g};$$

d'où, en divisant les deux équations membre à membre, on déduit

$$g = \frac{\alpha' r}{\alpha - \alpha'}. \qquad (1)$$

Il est facile de vérifier que la valeur minima de l'erreur relative $\frac{dg}{g}$ correspond à $\frac{\alpha}{\alpha'} = 2{,}4$.

L'erreur n'est pas sensiblement plus grande si l'on adopte le rapport $\frac{\alpha}{\alpha'} = 2$; la méthode est alors connue sous le nom de *méthode de la demi-déviation*. Dans ce cas, la résistance en série avec le galvanomètre dans la seconde expérience est choisie de manière à réduire de moitié la déviation α obtenue d'abord ; de la sorte, si la résistance du shunt de la pile est négligeable, on a

$$g = r.$$

En conduisant la discussion comme dans la méthode de Faraday pour la mesure de la capacité des condensateurs, on trouve

$$\frac{dg}{g} = 6\,\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Ce résultat montre que l'approximation dont la méthode est

susceptible n'est pas grande. Aux erreurs de lecture peut encore s'ajouter celle provenant d'une polarisation éventuelle de la pile pendant les tâtonnements. D'ailleurs, la différence de potentiel aux

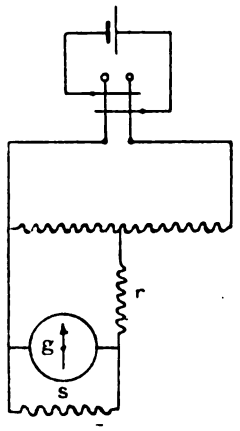


Fig. 164.

extrémités du shunt n'est pas tout-à-fait invariable pendant les deux expériences. Si l'on appelle V et aV ses valeurs successives, a pouvant être calculé par l'application des lois de Kirchhoff, on arrive à la formule exacte

$$g = \frac{\alpha' r}{a\alpha - \alpha'}.$$

Le résultat à adopter est $g \pm dg$.

Méthode d'égale déviation. — On forme un circuit à l'aide du galvanomètre shunté, d'une boîte de résistance et d'une pile. En appelant s la résistance du shunt, r celle débouchée dans la boîte, et e la force électromotrice de la pile, on a, en supposant la résistance de cette dernière négligeable par rapport aux autres résistances du circuit,

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{r + \frac{g\,s}{g+s}} \frac{s}{s+g}. \qquad (1)$$

On enlève le shunt et l'on ramène la déviation à la même

valeur α en augmentant la résistance débouchée dans la boîte. Soit r' la résistance qui amène ce résultat,

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{e}{r' + g}. \qquad (2)$$

De là on déduit

$$g = \frac{s\,(r' - r)}{r}. \qquad (3)$$

Une erreur sur g peut provenir d'une erreur de réglage de la résistance r' amenée elle-même par une erreur de lecture ; or, on déduit de (2) et de (3)

$$dg = \frac{s\,d\,r'}{r}, \qquad (4)$$

$$\frac{d\alpha}{k} = -\frac{e\,d\,r'}{(r' + g)^2},$$

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = -\frac{dr'}{r' + g}.$$

Remplaçant, dans (4), dr' par sa valeur tirée de l'équation ci-dessus, on obtient

$$dg = -\,s\,\frac{r' + g}{r}\,\frac{d\alpha}{\alpha}$$

et ensuite

$$\frac{dg}{g} = -\,\frac{r' + g}{r' - r}\,\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Enfin, en substituant à r sa valeur tirée de (3), il vient

$$\frac{dg}{g} = -\left(1 + \frac{s}{g}\right)\left(1 + \frac{g}{r}\right)\frac{d\alpha}{\alpha} \text{ (M. de Weydlich).}$$

Cette équation apprend que l'erreur relative est diminuée lorsqu'on affaiblit le shunt s et qu'on augmente r'. Cependant, il n'y a pas intérêt à choisir un shunt très inférieur à g, car la somme $1 + \frac{s}{g}$ diminue assez lentement quand s devient plus petit que g, et la déviation décroît au contraire très rapidement avec s. Or, il faut chercher à obtenir la lecture la plus grande possible. Un raisonnement analogue montre qu'il n'y a pas grand avantage à rendre r' très supérieur à g. Cependant, on est amené à adopter

une forte résistance r', si le galvanomètre est doué d'une grande sensibilité. Lorsqu'on ne dispose pas d'une résistance suffisante, on peut shunter la pile.

Si s est assez petit par rapport à g et g par rapport à r', on a approximativement

$$\frac{dg}{g} = 2\frac{d\alpha}{\alpha},$$

ce qui montre la supériorité de cette méthode sur la précédente.

On peut faire, comme dans celle-ci, une correction pour tenir compte de la variation de potentiel due au shunt de la pile. On a, dans ce cas,

$$\frac{e\,s}{r\,(s+g)+sg} = \frac{a\,e}{r'+g},$$

d'où

$$g = \frac{s\,(r'-a\,r)}{a\,r+(a-1)\,s},$$

au lieu de

$$g = \frac{s\,(r'-r)}{r}.$$

Si le second terme du dénominateur est négligeable, on a pour la correction

$$-\frac{s\,(a-1)\,r'}{a\,r}.$$

La valeur de g est encore influencée par suite de ce qu'on peut modifier r et r' de quantités dr et dr' sans faire varier la déviation d'une manière appréciable. On a, en supposant que les erreurs qui en résultent s'ajoutent,

$$dg = s\,\frac{r\,dr' + r'\,dr}{r^2}.$$

Méthode de Lord Kelvin. — Une pile, shuntée suivant le dispositif ordinaire, fournit le courant dans un pont de Weatstone, dont le galvanomètre occupe la branche de résistance inconnue, fig. 165. Les côtés a, b, c sont réglés jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre reste invariable dans les deux positions de la clef insérée dans l'une des diagonales. On a alors, suivant la propriété générale des combinaisons de circuits de ce genre,

$$g = \frac{bc}{a}.$$

En appliquant la méthode VI, Kempe trouve qu'il faut prendre pour a une résistance aussi faible et pour x une résistance aussi forte que possible, la pile réunissant le point de jonction des branches les moins résistantes au point de jonction des branches

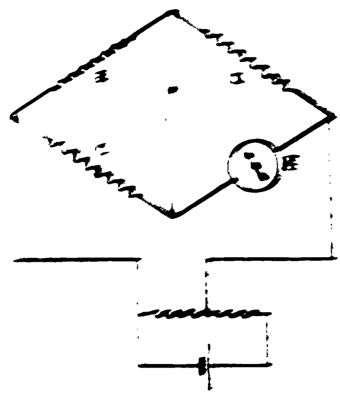


Fig. 165.

les plus résistantes et la déviation étant maxima. L'erreur limite s'apprécie expérimentalement, comme en général dans toutes les méthodes, en recherchant expérimentalement entre quelles limites on peut dérégler le pont sans apporter une différence sensible dans la déviation du galvanomètre.

Chapitre XXII.

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES.

Méthode par substitution. — La mesure de la résistance des électrolytes présente des difficultés par suite de la polarisation des électrodes, qui produit un accroissement apparent de résistance. D'après MM. Lippmann et Paalzow, un métal ne se polarise pas dans une solution d'un de ses sels. De là l'emploi des électrodes dites impolarisables.

Au lieu d'utiliser ces électrodes, on peut se servir de la méthode suivante, destinée à éliminer l'influence de la polarisation. L'électrolyte à essayer est versé dans un tube en V calibré. Les électrodes sont des rondelles transversales, en même métal que celui du sel, si c'est possible, ou, dans le cas contraire, en platine platiné. On fait passer dans l'électrolyte un courant qu'on mesure au galvanomètre. On rapproche les électrodes en manœuvrant un rhéostat intercalé dans le circuit, de manière à maintenir le courant constant. La résistance ajoutée représente la résistance de la partie de la colonne liquide supprimée.

La résistance des électrolytes diminuant rapidement quand la température augmente, il est important de maintenir celle-ci invariable pendant l'essai. Pour cela, on plonge le tube dans un bain

d'eau pourvu d'un thermomètre et l'on restreint la durée du passage du courant autant que possible. La résistibilité de l'électrolyte se déduit des dimensions du volume de liquide retranché.

Méthode par comparaison. — Dispositif de M. Bouty. — En deux points de la colonne liquide compris entre les deux électrodes, on fait arriver des fils de platine. On observe la différence de potentiel des extrémités de ces fils, à l'aide d'un électromètre ou d'un condensateur adjoint à un galvanomètre balistique. En comparant cette différence à la chute de tension dans une résistance métallique connue, intercalée dans le même circuit, on connaît la résistance comprise entre les fils de platine.

M. Bouty a adopté un dispositif dans lequel il fait usage d'électrodes impolarisables, consistant en une solution de sulfate de zinc dans laquelle le courant arrive par des électrodes en zinc amalgamé. Le liquide à essayer est enfermé dans un tube en double hélice,

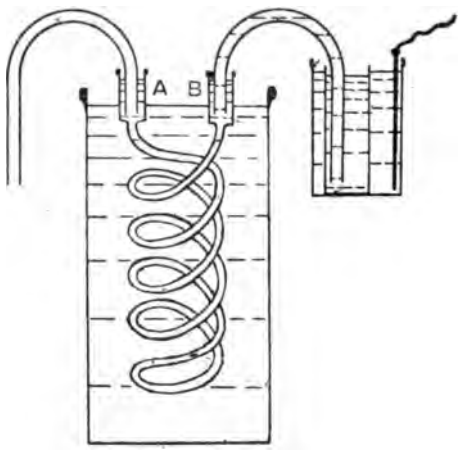


Fig. 166.

terminé par des coupes élargies et plongeant dans un bain à température constante. Les coupes A et B communiquent par des siphons gros et courts avec des vases poreux, dont un seul est figuré, et qui sont remplis, comme les siphons, du liquide à l'essai. Les vases poreux sont placés dans des auges contenant la solution

de sulfate de zinc et les électrodes en zinc par lesquelles arrive le courant. M. Bouty relève la différence de potentiels au moyen d'un électromètre Lippmann, qui communique avec le liquide des auges et qu'il ramène au zéro par l'action compensatrice d'une dérivation prise sur une boîte de résistance traversée par le courant d'une pile, fig. 167.

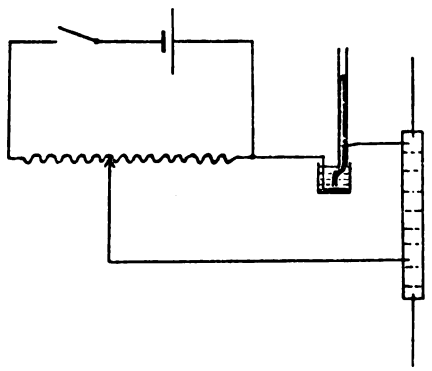


Fig. 167.

La résistance du liquide dans les siphons, les coupes et les vases poreux ne représente que le 0,001 de la résistance de la colonne en hélice et peut donc être négligée.

Méthode de M. Kohlrausch. — M. Kohlrausch a eu l'idée d'appliquer aux électrolytes la méthode du pont de Wheatstone, en plaçant dans la diagonale où se trouve habituellement la pile le circuit secondaire d'une bobine d'induction, dans lequel se développe une force électromotrice alternative incapable de produire l'électrolyse. Le galvanomètre est remplacé par un électrodynamomètre; on augmente la sensibilité de celui-ci en faisant passer le courant alternatif total dans l'une des bobines, ce qui permet aussi l'interversion du sens des déviations. Lorsque l'on n'exige qu'une approximation de 2 à 3 pour 100, il est plus commode de procéder au réglage à l'aide d'un téléphone, qui rend un son aussi longtemps que le courant alternatif ne s'annule pas dans la diagonale correspondante. Il faut avoir soin de constituer les branches du pont par des conducteurs sans réactance, afin d'éviter tout accroissement apparent de leur résistance. Le mieux est d'adopter

des fils droits pour former les côtés du pont. Il faut aussi éviter toute capacité susceptible de diminuer, d'une manière appréciable, l'impédance des côtés. La fig. 168 montre une disposition portative du pont de M. Kohlrausch, dans laquelle les branches de proportion sont prises sur un fil divisé B C, le long duquel glisse un contact à curseur. La branche de comparaison est une boîte de

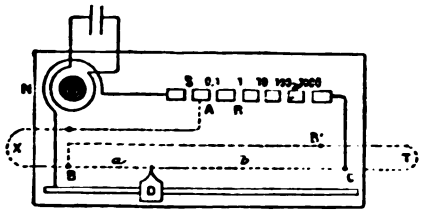


Fig. 168.

bobines à double enroulement. Le téléphone se dispose en T et l'électrolyte en x. Pour les mesures approximatives, la méthode a l'avantage d'une grande rapidité ; sa précision dépend de la sensibilité d'oreille de l'observateur. On reproche au procédé de M. Kohlrausch d'être affecté par la capacité de polarisation des électrodes et de mesurer l'impédance de l'électrolyte au lieu de sa résistance.

Chapitre XXIII.

RÉSISTANCE DES TERRES.

Objet de la mesure. — Le circuit d'une ligne électrique aérienne ou souterraine se complète souvent par un retour par la terre, obtenu en reliant la ligne, aux deux extrémités, soit à des plaques métalliques plongeant dans l'eau ou le sol humide, soit à des conduites d'eau ou de gaz, soit à d'autres conducteurs métalliques possédant de larges surfaces de contact avec le sol. La mesure de la résistance de ce retour présente la même difficulté que celle des électrolytes, par suite de la polarisation que le courant d'essai occasionne aux plaques de terre. De plus, si ces plaques sont très distantes, on constate des *courants telluriques* dus à la distribution inégale des potentiels à la surface du globe, distribution qui varie incessamment et produit des variations correspondantes dans l'intensité des courants terrestres. Ces circonstances rendent difficile l'appréciation exacte de la résistance apparente d'une terre.

Cas de deux lignes parallèles. — Soient deux lignes de résistances r_1 et r_2, réunies aux mêmes plaques de terre. On détermine, par exemple à l'aide du pont de Wheatstone, la résistance totale de la ligne r_1 et du retour par la terre en considérant comme zéro du

galvanomètre la déviation causée par le courant tellurique et en adoptant une pile d'essai capable de fournir une force électromotrice très supérieure à celle qui produit ce courant. On a

$$R_1 = r_1 + x.$$

Une deuxième mesure faite sur la seconde ligne donne

$$R_2 = r^2 + x.$$

En bouclant les deux lignes aux extrémités, on mesure

$$R_3 = r_1 + r_2$$

d'où

$$x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}.$$

Autre méthode. — Une autre méthode consiste à envoyer dans le circuit d'une des lignes un courant i assez intense pour qu'on puisse le mesurer par un ampèremètre et à déterminer, au moyen de l'autre ligne et d'un voltmètre, la différence de potentiel V comprise entre l'extrémité éloignée de la première ligne et la plaque de terre de la station où l'on se trouve. La résistance apparente cherchée est

$$x = \frac{V}{i}.$$

Cette méthode est particulièrement applicable à la mesure de la résistance du retour des lignes de tramway électrique. Le courant normal de travail est envoyé par un feeder et la différence de potentiel se relève par l'intermédiaire du fil de trolley.

Mesure de la résistance des terres d'un paratonnerre. — On relie un paratonnerre au sol par des plaques métalliques plongeant dans des puits distants d'au moins 10 mètres, afin d'être sûr de rencontrer une nappe souterraine d'une étendue et d'une conductibilité suffisantes. A défaut de puits, on plonge les pièces de contact, plaques, tuyaux, dans des fosses remplies de coke concassé. Le cas échéant, on connecte le paratonnerre à des conduites souterraines d'eau et de gaz. Voici comment on peut apprécier grossièrement la valeur relative de ces diverses terres: Appelons x, y, z, les résistances de contact de trois des prises de terre

et négligeons la résistance du sol et des fils de connexion. Par l'intermédiaire de ces fils, on mesure séparément, au pont de Wheatstone ordinaire ou par la méthode de Kohlrausch,

$$R_1 = x + y,$$
$$R_2 = x + z,$$
$$R_3 = y + z;$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2},$$
$$y = \frac{R_1 + R_3 - R_2}{2},$$
$$z = \frac{R_2 + R_3 - R_1}{2}.$$

Chapitre XXIV.

DÉTERMINATION DES RÉSISTIBILITÉS.

Résistibilité des conducteurs. — La détermination de la résistibilité d'un conducteur est l'un des problèmes qui se posent le plus fréquemment à l'électricien, soit qu'il s'agisse d'un fil ou d'un câble aérien ou souterrain, soit des barres ou des fils utilisés à l'enroulement des électro-aimants et des dynamos.

La mesure consiste à déterminer la longueur l cm, la section s cm² et la résistance r ohms de l'échantillon fourni. La résistibilité est, en ohms-cm, à la température où l'on a opéré,

$$\rho = \frac{r\,s}{l}.$$

Cette expression montre que, si l'on veut connaître la résistibilité avec une erreur limite de $\frac{1}{2}$ pour 100, les erreurs limites commises sur la résistance, le diamètre et la longueur doivent être inférieures à $\frac{1}{8}$ pour 100, en admettant qu'on ne commette pas d'erreur dans l'évaluation de la température du fil.

Lorsque le fil à essayer est isolé, on commence par le dénuder en ayant soin de ne pas altérer sa section. Si la couverture est en coton ou en soie, on peut la dissoudre dans une solution de soude caustique.

La mesure de la longueur se fait sur le fil redressé au préalable; il faut éviter d'étirer le fil de peur de l'écrouir. Si l'échantillon est assez long, on peut, par exemple, mesurer une longueur de quelques mètres sur un sol uni, à l'aide d'un mètre étalon et étendre le fil suivant la direction mesurée. Si l'échantillon est court, la mesure de la longueur doit être faite avec beaucoup de précautions pour éviter une erreur relative importante ; souvent on emploie dans ce cas, pour la détermination de la résistance du conducteur, des appareils de mesure permettant d'évaluer la résistance comprise entre des couteaux dont l'écartement est connu et sur lesquels le fil est appuyé.

Lorsque les conducteurs sont cordés, il faut mesurer la résistance d'un brin détaché du câble. Toutefois, comme le redressement de ce brin exige un étirage du conducteur, on se contente souvent d'indiquer la résistance d'une longueur donnée du câble, à une température déterminée. La résistibilité du cuivre doit être mesurée avant le câblage.

La détermination de la section moyenne du conducteur peut se faire aisément, comme on l'a vu au chapitre II, si l'on connaît la densité du métal. Celle-ci s'obtient en pesant le fil dans l'air, puis dans l'eau bouillie, en évitant les bulles adhérentes. De la masse du fil, de sa longueur et de sa densité, on déduit sa section moyenne.

Un autre procédé pour déterminer le diamètre moyen de la section consiste à employer une jauge, mais ce moyen est très grossier dans le cas de fils minces.

La mesure de la résistance peut être effectuée au pont de Wheatstone, au double pont de Kelvin ou par des méthodes analogues, suivant qu'on a affaire à une résistance moyenne ou à une résistance faible.

Pour connaître la résistibilité à 0° C, il faut faire la correction relative à l'échauffement, ce qui exige la connaissance de la température du fil pendant la mesure et du coefficient de variation de sa résistance. On laisse le fil pendant plusieurs heures dans un local à température constante avant de mesurer sa résistance. On a soin de ne pas toucher le fil avec les doigts pendant les manipulations, pour ne pas l'échauffer. On le manie, par exemple, avec

des pinces en bois. La formule de correction utilisée, dans les limites de température ordinaires, est de la forme

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

Les résistances de comparaison ne nécessitent pas de correction pour la température si elles sont en manganine ou en un alliage analogue.

Afin d'éviter la correction de température dans la mesure de la résistibilité du cuivre, on adopte souvent, comme étalon de comparaison, un fil de cuivre de résistance connue, qu'on laisse dans le même endroit que le fil essayé, afin d'obtenir l'équilibre de température. Pour faire la mesure, il suffit, par exemple, d'envoyer un courant faible dans les deux fils reliés en série et de comparer les différences de potentiel aux extrémités de ceux-ci, au moyen d'un galvanomètre sensible de grande résistance.

Soient V et V′ les tensions correspondant aux deux fils;

r et r' les résistances;

ρ et ρ' les résistibilités;

l et l' les longueurs;

s et s' les sections;

on a, pour un courant i,

$$\rho = \frac{V}{i}\frac{s}{l},$$

$$\rho' = \frac{V'}{i}\frac{s'}{l'}.$$

On en tire

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{V}{V'}\frac{s}{s'}\frac{l'}{l}.$$

Si l'on relève la tension sur les deux fils à l'aide de deux couteaux séparés par un manche isolé, qu'on appuie sur les conducteurs, on a

$$l = l',$$

et

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{Vs}{V's'} = \frac{\alpha}{\alpha'}\frac{s}{s'},$$

α et α' désignant les lectures au galvanomètre supposé proportionnel.

Les praticiens ont conservé l'habitude de désigner la conductibilité des fils par comparaison avec celle d'un cuivre spécial étalonné par Matthiessen et considéré longtemps comme pur. Ce cuivre mesure 1,584 microhms-cm à 0°C, lorsqu'il est recuit. Actuellement, le commerce peut livrer du cuivre ayant une conductibilité de 102 et 103 pour 100 de celle du cuivre Matthiessen, ce qui montre l'inconvénient de ce mode de comparaison.

Résistibilité des électrolytes. — La mesure de la résistance d'un électrolyte de dimensions déterminées s'opère par l'une des méthodes exposées au chapitre XXII. Si l'électrolyte présente une section constante s et une longueur l, sa résistibilité est, comme dans le cas précédent,

$$\rho = r\,\frac{s}{l}.$$

La température a une importance considérable, eu égard à la grande variation de la résistance des électrolytes avec cet élément. La formule appliquée par M. Bouty aux solutions salines étendues est

$$R_0 = R_t\,(1 + 0{,}0337\,t).$$

Résistibilité des diélectriques. — La résistibilité du diélectrique des câbles étant très élevée s'estime ordinairement d'après la valeur de la résistance à l'isolement d'un long fil couvert du diélectrique sous une épaisseur connue. On verra, au chapitre XXVI, avec quelles précautions doit s'exécuter cette mesure. Si R mégohms est la résistance à l'isolement trouvée pour un fil de longueur l cm, dont l'enveloppe à un diamètre extérieur D cm et dont le diamètre du conducteur est d cm, la résistibilité du diélectrique est, en mégohms-cm,

$$\rho = \frac{2{,}728\,R\,l}{\operatorname{Log}\frac{D}{d}}.$$

L'influence de la température est plus grande encore pour les diélectriques que pour les électrolytes. La formule de correction est exponentielle. Pour la gutta-percha, on a

$$R_t = R_0 \times 0{,}894^t,$$

entre 0° et 38° C.

Chapitre XXV.

RÉSISTANCE DES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

Détermination de la résistance d'un câble électrique à l'usine. — Les cahiers des charges relatifs aux câbles électriques spécifient la résistance kilométrique du conducteur à une température donnée. Si le câble est recouvert d'une gaîne imperméable, l'essai se fait après en avoir immergé une longueur connue dans une cuve dont on maintient l'eau à une température constante pendant 24 heures, afin que l'équilibre des températures s'établisse à travers la gaîne mauvaise conductrice. La mesure s'effectue au pont de Wheatstone, par exemple, et l'on a soin de déterminer la résistance des fils de connexion avant et après l'expérience, afin de déduire la moyenne trouvée de la résistance totale obtenue. Il y a lieu de faire les corrections pour la température, pour ramener le résultat à la température indiquée au cahier des charges.

Détermination de la résistance d'une canalisation posée. — Deux cas se présentent :

a) il existe plusieurs conducteurs entre les points extrêmes ;

b) il n'y a qu'un seul conducteur et le retour se fait par le sol, ce qui est le cas des longues lignes sous-marines.

Cas de plusieurs lignes. — On établit un circuit métallique en bouclant deux des conducteurs à l'un des postes extrêmes et l'on détermine la résistance de ce circuit en connectant les deux bouts disponibles aux appareils de mesure par des fils de jonction, dont la résistance doit être déduite du résultat trouvé.

Si l'on dispose de trois lignes, on peut faire trois combinaisons de ce genre, dont les résultats permettent de déterminer séparément la résistance de chacune des lignes.

Un tel essai est forcément moins précis que l'essai des câbles à l'usine ; on ne peut en effet faire la correction pour la température, attendu que celle-ci n'est pas connue. On a précisément recours à un essai de la ligne posée pour déterminer la température moyenne du câble, mesuré au préalable à l'usine ; l'on applique la formule

$$R_t = R_{t'} \left\{ 1 + \alpha (t - t') \right\}$$

dans laquelle t' est la seule inconnue. La connaissance de cette température moyenne permet de faire la correction de la résistance à l'isolement du câble, résistance qui varie beaucoup plus que celle du conducteur avec la température.

Cas d'une ligne unique. — Dans le cas où l'on ne dispose que d'une ligne unique entre les deux postes extrêmes, il est nécessaire de compléter le circuit par la terre, la ligne étant reliée d'une part aux appareils de mesure, d'autre part au sol. On fait ainsi intervenir dans le résultat la résistance du retour par la terre, qui est peu importante si la ligne est longue.

Supposons que l'essai s'opère au moyen du pont de Wheatstone, qui est l'appareil le plus employé pour ce genre de mesures. Une difficulté surgit du fait des courants telluriques produits par des différences de potentiel qui existent entre les divers points de la terre. Les forces électromotrices qui donnent naissance à ces courants ne dépassent généralement pas quelques volts et elles ne varient que très lentement, sauf au moment des orages magnétiques, où elles peuvent atteindre des centaines de volts et varier très rapidement. Il existe aussi des forces électromotrices dues à la polarisation des plaques de terre, mais celles-ci sont inférieures à 1 volt.

Pour éliminer ces effets perturbateurs, on traite la ligne comme une résistance contenant une force électromotrice en appliquant une méthode d'essai analogue à celle de Mance (chap. XXXI) et qu'on désigne sous le nom de *méthode du faux zéro*. On considère la déviation du galvanomètre occasionnée par le courant tellurique, avant l'abaissement de la clef de la pile, comme le zéro de l'échelle et l'on règle les branches du pont de manière à maintenir l'index dans cette position. Il est bon d'employer une pile assez forte, de 50 à 100 éléments Daniell, par exemple, afin de rendre minimum l'effet relatif du courant tellurique. On n'abaisse la clef du galvanomètre que 10 à 20 secondes après la clef de la pile, pour éviter l'influence sur l'instrument du courant de charge du câble.

Pour plus d'exactitude, on répète l'essai après avoir renversé le courant de la pile d'essai, ce qui intervertit le sens du courant dans la ligne, et l'on prend la moyenne des résultats.

Un moyen de neutraliser les forces électromotrices de la ligne consiste à intercaler dans celle-ci quelques éléments de pile, dont on fait varier la tension aux bornes, à l'aide d'un rhéostat en dérivation, de manière à introduire dans la ligne une différence de potentiel égale et opposée aux forces électromotrices perturbatrices. On vérifie que le résultat est atteint à l'aide du galvanomètre, dont l'aiguille doit revenir au zéro avant l'abaissement de la clef d'inversion disposée à la suite de la pile d'essai du pont.

Chapitre XXVI.

ISOLEMENT DES CANALISATIONS.

Isolement des lignes aériennes. — On définit, sous le nom de résistance à l'isolement d'une canalisation, la résistance mesurée entre le conducteur et la terre. Elle est en raison inverse de la longueur de la ligne ; il s'ensuit que, pour conserver un taux de perte constant, l'isolement par unité de longueur doit croître avec l'étendue de la canalisation.

L'isolement des canalisations aériennes ou souterraines à conducteurs nus varie beaucoup avec l'état hygrométrique de l'air, à cause de la buée qui se dépose en quantité plus ou moins considérable sur les isolateurs. Dans une atmosphère très humide, l'isolement tombe souvent en dessous de 1 mégohm par kilomètre.

La mesure de l'isolement s'opère par l'une des méthodes employées pour l'évaluation des grandes résistances. Si l'isolement est très élevé, on adopte la méthode de comparaison, en observant la déviation occasionnée par un courant de perte dans un galvanomètre sensible et gradué au préalable, qu'on intercale entre la pile d'essai et l'une des extrémités de la ligne, celle-ci étant isolée à l'autre extrémité.

Lorsque la résistance d'isolement n'est pas très élevée, la mesure peut se faire simplement à l'aide du pont de Wheatstone.

Isolement des isolateurs. — La réception des isolateurs comporte la vérification de leur isolement. A cet effet, les isolateurs à cloche sont renversés dans une cuve contenant de l'eau jusqu'à 2 cm environ du bord des cloches ; de l'eau est également versée dans les cloches jusqu'au même niveau. On laisse les isolateurs dans cet état pendant 24 heures, afin de donner au liquide le temps d'imbiber les fissures que la porcelaine peut éventuellement présenter. On sèche alors les bords des isolateurs en promenant à proximité de leur surface un fer rouge ou une rampe à gaz; puis on mesure l'isolement en reliant les deux pôles d'une pile de 100 volts, l'un à l'eau de la cuve par une plaque baignant dans celle-ci, l'autre à l'eau qui remplit l'intérieur des cloches, un galvanomètre étalonné étant intercalé dans le circuit. Pour opérer rapidement, on tient la seconde électrode par un long manche en ébonite pour la plonger successivement dans chaque isolateur. Lorsque la déviation du galvanomètre dépasse celle qui correspond à l'isolement minimum exigé, 1 000 mégohms par exemple, on rebute l'isolateur défectueux.

Isolement des câbles recouverts de gutta-percha. — L'isolement des câbles télégraphiques souterrains et sous-marins, isolés à la gutta-percha, doit être déterminé méticuleusement, pour éviter les grandes dépenses qu'occasionnent les réparations des lignes défectueuses.

Les âmes, composées de conducteurs en cuivre recouverts de gomme isolante, sont fabriquées par bouts de 500 m. à 3 000 m. L'essai à l'usine n'a lieu qu'une quinzaine de jours après la fabrication, afin de laisser à la gutta-percha, dont la résistibilité a diminué pendant le travail, le temps de reprendre ses qualités. Les bouts à essayer sont lovés dans des cuves qu'on remplit d'eau maintenue, par des jets de vapeur, à une température de 24° C pendant 24 heures. Il faut ce temps pour assurer l'établissement de l'équilibre de température à travers l'enveloppe mauvaise conductrice de la chaleur.

La mesure de l'isolement s'effectue par la méthode et sous la tension spécifiées au cahier des charges, les résultats obtenus variant avec les conditions d'expérience. Une force électromotrice assez grande est nécessaire pour déceler les gerçures, qui ne se

manifesteraient pas avec une tension réduite, et pour rendre négligeables les effets de polarisation. Généralement, on procède à l'essai par la méthode de comparaison, en employant une pile de 100 éléments au sulfate de cuivre. On commence par étalonner le galvanomètre convenablement shunté, en s'aidant d'un seul élément et d'une boîte de résistance de 10 000 à 100 000 ohms. On détermine d'ailleurs le rapport de la force électromotrice de cet élément à celle de la pile entière d'après les élongations qu'accuse un galvanomètre balistique, quand on y décharge un condensateur chargé successivement à l'aide de ces deux forces électromotrices. Les élongations sont rendues comparables par l'emploi de shunts; on a soin de faire la correction que ceux-ci nécessitent (chap. VI).

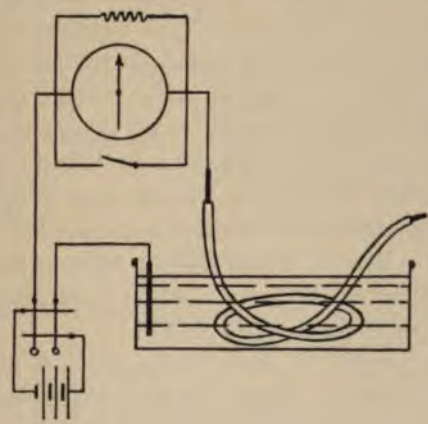


Fig. 169.

On connecte ensuite l'un des pôles de la grande pile à l'eau de la cuve, par l'intermédiaire d'une clef d'inversion, tandis que l'autre pôle est relié au câble, à travers le galvanomètre protégé par une clef de court-circuit, qui permet d'éviter le passage dans celui-ci du courant de charge initial.

Le plus grand soin doit être apporté à l'isolement des appareils, des piles et des fils de connexion. Les clefs et les bornes d'attache doivent être montées sur des colonnes en ébonite. L'isolement des fils de connexion est vérifié par une mesure préalable et l'on corrige, s'il y a lieu, dans l'essai définitif, l'erreur que leur emploi

entraîne. Il faut éviter qu'il puisse se produire des déperditions de courant par une couche d'humidité qui ferait éventuellement communiquer les bouts dénudés du câble avec l'eau de la cuve. On rafraîchit ces bouts en taillant la gutta-percha à l'aide d'un canif et en les enduisant de paraffine.

Il convient de disposer le galvanomètre comme la figure 169 l'indique et de ne pas intercaler cet appareil entre la clef d'inversion et la cuve, car les piles n'étant jamais parfaitement isolées, le courant de perte des éléments augmenterait la déviation de l'instrument.

Après avoir maintenu la clef d'inversion abaissée pendant 10 à 20 secondes, on ouvre la clef de court-circuit. Le shunt est réglé de manière à obtenir une déviation convenable. On note la lecture après 1 ou 2 minutes. Ce sont là les durées d'électrisation le plus souvent indiquées dans les cahiers des charges. Si l'on prolonge l'expérience, on constate que la déviation du galvanomètre va en décroissant de moins en moins vite jusqu'à une valeur fixe. On relève ensuite la clef de court-circuit et la clef d'inversion de manière à laisser le câble se décharger, après quoi on recommence l'essai en renversant le sens du courant : on adopte la moyenne des lectures. Les déviations servant au calcul de la résistance d'isolement sont celles observées après 1 ou 2 minutes d'électrisation. On apporte les corrections pour la température en s'aidant de la formule donnée au chapitre XXIV.

Si l'on recommençait la mesure par d'autres méthodes, telles que celle de la perte de charge, on trouverait d'autres résultats, car les isolants donnent lieu à des phénomènes d'hystérésis diélectrique que ne présentent pas les conducteurs ; ce qui fait que la mesure de la résistance des premiers n'est pas susceptible d'une grande précision.

La détermination de l'isolement d'un câble posé s'effectue par un procédé semblable au précédent, mais cet essai est moins précis encore, par suite de l'impossibilité de mesurer la température moyenne du câble. On peut calculer cette température en comparant la résistance du conducteur après la pose à sa résistance mesurée à l'usine, à une température connue.

Isolement des joints des câbles isolés à la gutta-percha. — La résistance d'isolement d'un joint ordinaire se rapproche de

10^6 mégohms, en sorte que la vérification de cet isolement exige des méthodes de mesure spéciales. Le plus souvent, les cahiers des charges spécifient que l'isolement d'un joint doit être équivalent à celui de 2 m de câble et que la comparaison doit être faite, par la méthode d'*accumulation*, avec une pile de 200 éléments au sulfate de cuivre.

Les deux rouleaux de câble réunis sont isolés et la jonction est plongée dans une cuve suspendue à des lanières en caoutchouc, afin d'assurer son isolement. Le circuit comprend la pile d'essai, une clef d'inversion, un condensateur, le conducteur du câble et

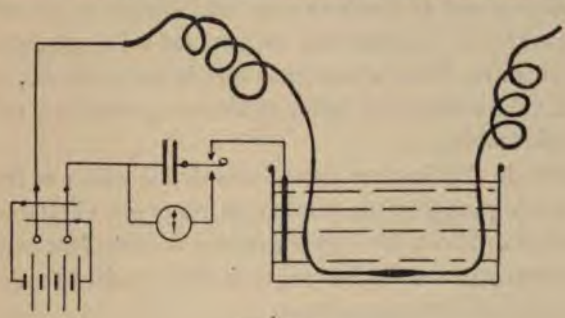


Fig. 170.

l'eau de la cuve, dans laquelle plonge une électrode métallique. Le condensateur peut ainsi se charger de la quantité d'électricité qui passe à travers le joint. L'effet de sa décharge dans le galvanomètre après une à deux minutes d'électrisation est comparé à celui de 2 m de câble, dans les mêmes conditions.

On vérifie si le circuit est bien isolé en abandonnant le condensateur chargé pendant 3 ou 4 minutes, la clef de décharge étant dans la position d'isolement et la clef d'inversion relevée. Il faut que l'élongation obtenue après ce temps ne diffère pas sensiblement de l'élongation due à une décharge immédiate.

L'essai des joints peut également se faire par la méthode de perte de charge (chapitre XIII), mais dans ce cas l'isolement du condensateur doit être très supérieur à celui du joint, condition difficile à réaliser.

Isolement des câbles industriels. — L'isolement exigé pour les câbles électriques industriels, pourvus d'une gaine imperméable,

est généralement très élevé. L'isolement kilométrique minimun doit atteindre plusieurs centaines de mégohms et l'on demande une résistance additionnelle, proportionnelle à la tension de service, d'au moins 25 mégohms par 100 volts, pour les applications utilisant des tensions considérables. Au premier abord, on ne conçoit pas la nécessité d'un isolement aussi grand, car la puissance perdue de ce chef pourrait devenir beaucoup plus forte sans cesser de représenter une très petite fraction de celle dissipée par l'effet Joule dans le conducteur. On a fréquemment exprimé l'opinion qu'un isolement kilométrique d'un mégohm suffirait largement. Mais la difficulté est de maintenir un tel isolement, les substances qui le procurent ne résistant pas en général à l'électrolyse. On est obligé de recourir à des corps, tels que le caoutchouc, le papier, le jute, qui, même sous une faible épaisseur, possèdent un pouvoir isolant considérable.

La mesure de l'isolement des câbles de ce genre se fait par des méthodes analogues à celles employées pour les câbles recouverts de gutta-percha. Les câbles imperméables doivent être essayés sous l'eau, de même que les câbles pourvus d'une gaîne de plomb, afin de vérifier l'étanchéité de celle-ci.

On étudiera au chapitre XXX les méthodes propres à vérifier l'isolement des réseaux électriques.

Chapitre XXVII.

CAPACITÉ DES CANALISATIONS.

La capacité des canalisations aériennes est minime. Elle est voisine de 0,01 microfarad par kilomètre pour un fil de cuivre de 3 mm de diamètre suspendu à 5 m au dessus du sol, ce dernier servant au retour du courant. Elle peut être mesurée par la méthode des comparaisons successives en opérant la décharge, et non la charge, à travers le galvanomètre, l'isolement que présentent les lignes aériennes étant souvent mauvais.

La capacité des câbles, particulièrement de ceux qui servent à la télégraphie, atteint près de 0,2 microfarad par kilomètre. La mesure peut se faire également par la méthode des comparaisons successives dans le cas de câbles courts; mais avec les longs câbles, il est nécessaire de recourir à une méthode de réduction à zéro, telle que celle de Lord Kelvin, afin d'éliminer, autant que possible, les erreurs qu'entraîne la différence entre les durées de la charge du câble et de celle d'un condensateur étalon. Des précautions du genre de celles que nous avons indiquées au sujet de l'essai d'isolement doivent être prises dans ce cas. La charge du câble s'opère ordinairement pendant une minute, avec une pile d'une centaine

d'éléments au sulfate de cuivre. Une correction est nécessaire pour tenir compte de la capacité des connexions. La correction pour la température est très peu importante avec la gutta-percha.

Lorsqu'on essaie la capacité d'un câble posé, les courants telluriques troublent parfois les mesures. On laisse alors le câble se charger d'abord sous l'influence du courant terrestre, puis on observe au galvanomètre la charge supplémentaire due à la pile d'essai. C'est l'élongation occasionnée par cette surcharge qu'on compare à celle que produit le condensateur étalon.

Chapitre XXVIII.

COEFFICIENTS D'INDUCTION DES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

La réactance des circuits tient à leur capacité et à leur self-induction. Dans les câbles sous-marins et souterrains, le premier élément est de beaucoup le plus important, mais dans les lignes aériennes le second joue un rôle sérieux, qui rend nécessaire la détermination des coefficients d'induction.

Coefficient d'induction mutuelle. — Le coefficient d'induction mutuelle de deux lignes peut s'estimer par comparaison avec une capacité, en ayant recours à la méthode de M. Carey-Foster, par exemple. Cet essai exige des corrections pour tenir compte de la capacité relative des deux lignes. Dans le cas où la terre fait partie du circuit, il faut, en outre, éliminer les courants telluriques, qui peuvent être neutralisés par une pile shuntée, comme on l'a vu à propos de l'essai de résistance des câbles.

Coefficient de self-induction. — Le coefficient de self-induction d'une ligne aérienne se détermine ordinairement par l'une des méthodes de comparaison avec la capacité d'un condensateur.

Ici encore la capacité de la ligne intervient; voici comment on

peut en tenir compte. On sait qu'une capacité C dérivée sur une résistance r joue le rôle d'une self-induction négative égale à $-Cr^2$. Supposons que la ligne de longueur l présente une self-induction $\mathfrak{L}$, une résistance R et une capacité c par unité de longueur. Si, à une distance x de l'extrémité reliée à la terre, nous considérons un condensateur de capacité cdx, dérivé par rapport au sol, la self-induction $\mathfrak{L}l$ est diminuée d'une quantité $cdx \times R^2x^2$.

Il s'ensuit que la self-induction apparente de la ligne entière est

$$\mathfrak{L}l - \int_0^l cdx\, R^2 x^2 = \mathfrak{L}l - \frac{c R^2 l^3}{3}$$

C'est cette expression qu'il faut introduire dans le calcul des résultats de la mesure.

Si l'on a affaire à une ligne double, c exprime la capacité relative des deux fils par cm.

La charge due à la capacité de la ligne diffère avec la répartition des potentiels le long des deux fils. Si les extrémités bouclées sont reunies à la terre, l'une des lignes prend une charge positive et l'autre une charge negative egale qui neutralise la première lors de la decharge. On ramene le cas de deux lignes au cas précedemment etudié en mettant à la terre, non la boucle, mais l'une des extremites libres : la charge est alors tout entiere positive ou negative.

Chapitre XXIX.

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

Essais périodiques. Méthode par courants reçus. — Les lignes télégraphiques, spécialement les lignes souterraines et sous-marines, doivent être l'objet d'essais périodiques qui ont pour but, d'une part, de vérifier l'état des lignes, d'autre part, de recueillir les données nécessaires pour localiser aisément, le cas échéant, la position des dérangements.

Ces essais consistent à déterminer la résistance électrique des lignes et la résistance d'isolement. Les résultats trouvés sont consignés dans des tableaux indiquant la date des essais et les circonstances dans lesquelles ceux-ci ont été faits; pour les lignes aériennes, il convient, par exemple, de renseigner l'état atmosphérique (brouillard, pluie, neige, ciel serein), l'humidité de l'air ayant une grande influence sur la résistance d'isolement.

Voici un moyen simple pour l'essai journalier des lignes télégraphiques d'un pays. Tous les postes dont les lignes convergent vers un bureau principal envoient, à des moments déterminés et différant entr'eux de quelques minutes, un courant continu vers le poste central, à l'aide de leur manipulateur et de leur pile de travail. Ces courants y sont reçus successivement dans un

galvanomètre étalonné et leurs intensités sont notées. Si un courant n'a pas son intensité normale, on procède, après la série des mesures, à des essais spéciaux, afin de vérifier si l'insuffisance est due à un défaut d'isolement de la ligne, à la fatigue de la pile du poste de transmission ou à d'autres causes. Pour vérifier l'état d'une pile, il suffit de mesurer la force électromotrice de ses éléments à l'aide d'un voltmètre approprié.

Ces essais journaliers sont excellents pour contrôler la décroissance graduelle des courants et juger du moment où il convient de procéder à l'entretien des lignes et des piles.

Dérangements des lignes télégraphiques. — Les dérangements des lignes télégraphiques peuvent être rangés dans les 3 classes suivantes :

1. *Communication accidentelle de la ligne avec la terre.* — Ce dérangement se produit, par exemple, lorsqu'un fil se rompt et qu'un des bouts libres tombe sur le sol, ou bien lorsque le fil est touché par une branche d'arbre, ou encore, dans le cas d'un câble, lorsque l'enveloppe isolante est perforée.

2. *Communication entre deux fils voisins.* — Cette communication résulte soit du bris d'un fil aérien dont les tronçons viennent toucher les fils voisins, soit du mélange des fils ballotés par le vent; la liaison peut aussi être établie par un objet intermédiaire.

3. *Interruption de la ligne.* — Ce dérangement ne se présente guère que dans les câbles souterrains ou sous-marins, dont le conducteur peut être rompu, tout en restant isolé par son enveloppe de gutta-percha. Dans les lignes aériennes, un fil brisé tombe à terre ou sur un autre fil et le dérangement rentre dans l'un des cas énoncés ci-dessus.

Lorsqu'un défaut se produit, on commence par le localiser entre deux postes, puis, dans le cas d'une ligne aérienne, on envoie le long de celle-ci un poseur qui relève la faute et la répare. Cette visite peut se faire très rapidement lorsque la ligne longe un chemin de fer : l'agent, placé dans le fourgon d'un train, suit des yeux le fil qui lui a été indiqué et dont la position relative sur les poteaux reste invariable.

Mais s'il s'agit d'un câble souterrain ou sous-marin, ou encore d'une très longue ligne aérienne, il faut recourir à des essais électriques pour déterminer l'endroit où existe le dérangement. On fait un essai préliminaire permettant de déceler la nature de celui-ci. Pour cela, l'on envoie le courant d'une pile sur la ligne, à travers un galvanomètre. La résistance normale de la ligne étant connue par les essais périodiques, si la déviation indique une intensité plus grande que celle déduite de la loi d'Ohm, il y a une perte en un point de la ligne; si la déviation est très faible, il y a interruption; enfin, si le courant est reçu par un fil voisin, il y a contact entre deux fils.

Connaissant la nature du dérangement, on procède à la localisation de ce dernier. Considérons d'abord le cas du contact d'un fil avec la terre ou avec un autre fil. On détermine la résistance x de la section de ligne comprise entre le poste où l'on se trouve et le contact. Il est clair que si r représente la résistance kilométrique du fil, le rapport $\frac{x}{r}$ mesure, en kilomètres, la distance du défaut au poste d'observation. Dans la recherche de la position d'une faute sur un câble sous-marin, on tiendra compte du mou du câble.

Perte en un point de la ligne. — Supposons qu'une ligne sous-marine soit parfaitement isolée, mais que le diélectrique soit percé en un point. Soient x et y les résistances des deux tronçons séparés par le défaut. Leur somme est connue par les essais périodiques.

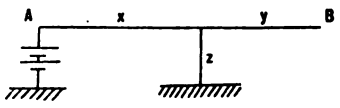


Fig. 171.

Appelons z la résistance de la faute. En déterminant au poste A la résistance de la ligne lorsqu'on met à terre et isole successivement l'extrémité B, on relève des valeurs permettant de déterminer x, y et z. Toutefois, certaines circonstances rendent souvent cet essai très difficile.

En premier lieu, une ligne n'est jamais parfaitement isolée. Si la résistance d'isolement est de l'ordre de celle du défaut, on peut

considérer la première comme due à une faute permanente située au milieu de la ligne. Le défaut localisé par l'essai est alors un défaut résultant fictif, ayant son point d'application entre la faute réelle et la faute due à l'isolement imparfait. Connaissant le siége de cette dernière et sa grandeur par les essais périodiques, ainsi que la position et l'importance de la faute résultante, on peut, en raisonnant comme dans le cas de la composition de forces parallèles, trouver la grandeur et le point d'application du défaut existant. Ce calcul constitue la correction de Taylor.

On peut d'ailleurs trouver plus simplement le résultat cherché en appliquant les lois de Kirchhoff aux résistances combinées qu'on mesure dans ce cas. Comme il n'y a que les trois inconnues x, y et z, les essais fournissent suffisamment d'équations pour les calculer.

Mais le problème est indéterminé s'il existe sur une ligne simultanément plusieurs défauts, dont les positions ainsi que les grandeurs sont inconnues, attendu qu'une infinité de combinaisons peuvent fournir les résistances combinées qu'on mesure de l'un des bouts. C'est pourquoi il est si important de procéder à des essais périodiques, particulièrement sur les lignes sous-marines dont les réparations entraînent parfois des frais énormes. On peut ainsi localiser les défauts à mesure qu'ils se produisent.

Le problème se complique d'ailleurs par le fait que la résistance des fautes est variable. Considérons le cas le plus simple d'un défaut unique constitué par une fissure dans la gaîne de gutta-percha. La résistance du défaut comporte celle du liquide qui remplit la fissure et devant laquelle la résistance du retour par la mer peut être négligée, ainsi que la résistance de contact de l'eau avec le conducteur ; cette dernière dépend de la nature des dépôts que l'électrolyse produit sur celui-ci. Si l'on envoie par l'un des bouts du câble, isolé à l'autre bout, un courant qui rend le conducteur positif par rapport à l'eau de la mer, le cuivre se couvre d'une couche d'oxychlorure qui accroît progressivement la résistance du défaut. En envoyant ensuite un courant de sens inverse, le dépôt se réduit par l'hydrogène et les alcalis provenant de la décomposition de l'eau salée. Lorsque le dépôt est entièrement réduit, la résistance de la faute ne dépend plus que du liquide qui remplit la fissure de la gaîne isolante et elle passe

par un minimum qui est de courte durée, car l'hydrogène qui se dégage ensuite par bulles et la soude qui environne le métal rendent la résistance du défaut très variable. C'est ce minimum qu'il faut essayer de saisir. Dans ce but, M. Lumsden conseille d'envoyer au préalable un courant réducteur, à l'aide d'une pile énergique, pendant 10 à 12 heures, pour nettoyer le conducteur. On renverse le sens du courant de temps en temps pendant quelques minutes, afin de détruire la soude formée et de précipiter le cuivre qui s'est dissout; ce traitement procure une surface rugueuse favorable au dégagement de l'hydrogène. Le conducteur est ensuite recouvert d'une couche d'oxychlorure de cuivre par un courant oxydant de 20 à 30 milli-ampères appliqué durant une minute environ. On mesure alors la résistance à l'aide du pont de Wheatstone et avec un courant réducteur. La résistance va en décroissant; on suit ses variations par un réglage continu du pont. A un moment donné, la résistance s'élève brusquement, par suite du dégagement de l'hydrogène : on adopte la valeur minima trouvée.

M. Kennely a indiqué une formule empirique permettant de déterminer la résistance d'une faute. Pour des courants inférieurs à 25 milli-ampères, la résistance du défaut peut être représentée par

$$f = \frac{K}{\sqrt{i}},$$

On verra plus loin le parti qu'on peut tirer de cette formule.

Enfin, une dernière cause d'erreur dans les mesures qui nous occupent est due aux courants telluriques et de polarisation que nous avons déjà rencontrés dans la mesure de la résistance des lignes. A ces courants s'ajoute, dans le cas des câbles sous-marins, le courant que produit la pile constituée à l'endroit du défaut par le cuivre à nu, le fer de l'armature et l'eau de la mer. Cette pile, dont le cuivre est le pôle positif, détermine dans le conducteur un courant allant de la faute vers les extrémités reliées à la terre. On élimine ces influences, soit en adoptant la méthode du faux zéro (chap. XXV) dans la mesure de la résistance, soit en neutralisant les courants parasites au moyen d'une pile intercalée dans la ligne et shuntée convenablement.

Méthode de Blavier. — Supposons qu'un câble présente une perte unique et constitue la seule communication disponible entre les postes qu'il relie.

On établit les connexions indiquées dans la fig. 172 et l'on mesure la résistance du câble, d'abord isolé au bout extrême, puis relié à la terre, en observant les précautions indiquées dans le paragraphe ci-dessus. Une pile shuntée p sert à neutraliser les courants para-

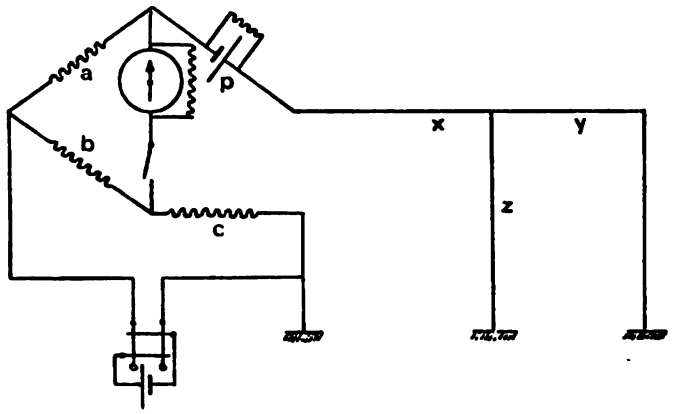


Fig. 172.

sites dont le câble est le siége. Le galvanomètre n'est relié au circuit que lorsque le courant de charge a pris fin. On emploie un appareil Deprez et d'Arsonval, afin de pouvoir procéder rapidement. Soient r_1, r_2, r_3 les résistances du conducteur, du câble isolé et du câble mis à terre,

$$r_1 = x + y,$$

$$r_2 = x + z$$

et

$$r_3 = x + \frac{yz}{y+z}.$$

On déduit de là

$$x = r_3 - \sqrt{(r_2 - r_3)(r_1 - r_3)},$$

$$y = r_1 - r_3 + \sqrt{(r_2 - r_3)(r_1 - r_3)}.$$

On peut répéter les essais à l'autre bout de la ligne et prendre des moyennes.

Méthode de M. Kennely. — En admettant la formule empirique de M. Kennely, d'après laquelle la résistance apparente de la faute est

$$\zeta = \frac{K}{\sqrt{i}},$$

lorsque i est inférieur à 25 milli-ampères, on peut procéder comme suit.

On mesure $x + \zeta$ au pont de Wheatstone avec différentes intensités de courant; soient r_1 la résistance $x + \zeta_1$ lorsque le courant à travers le défaut est i_1, et r_2 la résistance avec un courant quadruple. On a

$$r_1 = x + \zeta_1,$$

$$r_2 = x + \frac{\zeta_1}{2},$$

d'où

$$x = 2r_2 - r_1.$$

On emploiera, par exemple, des courants de 2, 3, 4 milli-ampères, puis des courants de 8, 12, 16 milli-ampères et l'on prendra la moyenne des résultats obtenus.

Méthode de la boucle. — Lorsqu'on dispose de plusieurs conducteurs entre les postes extrêmes, on peut localiser le défaut avec beaucoup plus de sûreté que par les méthodes précédentes, en faisant usage du procédé suivant, qui permet d'éliminer l'influence de la résistance du défaut. On boucle le conducteur défec-

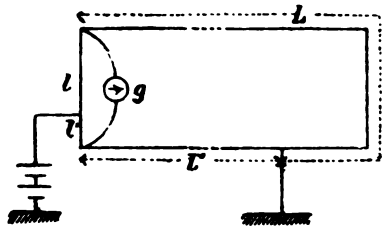


Fig. 173.

tueux avec un conducteur intact à l'un des postes et l'on constitue, à l'autre poste, un pont de Wheatstone à l'aide d'un galvanomètre, de deux boîtes de résistance l et l' et d'une pile. Celle-ci est

pourvue d'une clef d'inversion, et une clef de court-circuit empêche le courant de charge de détériorer le galvanomètre. On règle la résistance des boîtes jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. La résistance du défaut étant intercalée dans la diagonale de la pile n'influence pas la mesure par ses variations.

Lorsque l'équilibre est atteint, on peut poser

$$\frac{L}{L'} = \frac{l}{l'}.$$

On détermine, d'autre part, $L + L' = r$ par la méthode ordinaire du pont. Ces deux relations font connaître L et L'. Si le tronçon l' est très court, on ajoute une résistance connue à sa suite, afin de permettre une exactitude plus grande dans la mesure. Lorsqu'on dispose de plus d'un conducteur sain entre les mêmes postes, on répète la mesure avec chacun d'eux et l'on prend des moyennes.

Communication entre deux lignes voisines. — Dans le cas d'un contact entre deux lignes, on isole à l'un des postes l'extrémité de l'une d'entr'elles et l'on met l'extrémité de la seconde à la terre; à

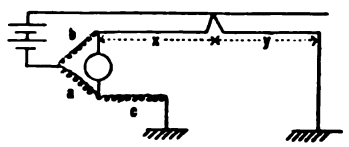


Fig. 174.

l'autre poste, on complète un pont de Wheatstone par les connexions indiquées sur la fig. 174. L'essai par le pont permet de déterminer le rapport $\frac{x}{y+c}$, tandis que les mesures périodiques font connaître $x+y$.

Cette méthode élimine complétement l'influence de la résistance du contact. Cette résistance variable est reportée sur une diagonale du pont et sa valeur n'affecte en rien l'équilibre.

Si l'on dispose d'un troisième fil sain entre les mêmes postes, on peut adopter la méthode de la boucle en utilisant l'un des fils défectueux à la place du retour par la terre.

Interruption d'une ligne. — Lorsque le conducteur d'un câble est rompu et que les deux tronçons restent isolés dans la gaîne de gutta-percha, on détermine successivement la capacité de ceux-ci par l'une des méthodes de réduction à zéro recommandées pour les câbles. Les mesures périodiques faisant connaître la capacité kilométrique, on arrive ainsi à établir l'endroit de la rupture.

Souvent, dans le cas d'interruption d'une ligne sous-marine, la gaîne isolante est également rompue et le conducteur est en contact avec l'eau de mer, au moins par un bout. On utilise alors avec avantage la méthode de Kennely, décrite ci-dessus, pour déterminer la résistance du conducteur jusqu'à l'endroit défectueux.

Chapitre XXX.

ESSAIS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.

Isolement des réseaux. — Les canalisations électriques urbaines transportant des courants de basse tension possèdent une résistance d'isolement assez faible. Le réseau à 3 conducteurs de Berlin, qui est constitué par des câbles armés du système Siemens et Halske, comportait, en 1894, 700 kilomètres de câbles souterrains, débitant un courant total de 80 000 ampères sous la tension de 220 volts entre les conducteurs extrêmes. L'isolement total n'était que de 14 ohms environ. Les installations des abonnés raccordées à un tel réseau présentent un développement dont il est impossible de déterminer exactement la longueur et elles possèdent un isolement assez médiocre. On ne peut donc, dans ce cas, baser le calcul de la résistance d'isolement sur la longueur réelle des conducteurs.

Afin de tourner la difficulté, M. Picou a proposé de considérer l'étendue de la canalisation comme proportionnelle à l'intensité du courant total circulant dans le réseau. Si l'on admet, en outre, que l'isolement doit croître comme la tension, la résistance d'isolement totale d'un réseau peut être exprimée par la formule

$$r = k\frac{e}{i},$$

e étant la différence de potentiel desservant le réseau et i le courant

total débité par celui-ci. Le coefficient de proportionnalité reste à déterminer. Dans l'exemple de Berlin, il a pour valeur

$$k = \frac{ir}{e} = \frac{80\,000 \times 14}{220} = 5091.$$

On peut ainsi déterminer l'isolement que doit présenter une portion quelconque d'un réseau, pourvu qu'on connaisse la tension et le courant correspondants. Dans le cas idéal d'une machine alimentant un réseau parfaitement isolé, la distribution des potentiels absolus dans le réseau est indéterminée, attendu que les lois du courant ne s'occupent que des potentiels relatifs. Mais si un point de la canalisation est mis à la terre, ce point doit prendre immédiatement le potentiel du sol, car, sinon, un courant permanent s'écoulerait du point considéré vers le sol, ce qui est impossible puisque dans ces conditions le circuit de la terre n'est pas fermé. Il en résulte que le potentiel en tous les points du réseau est alors déterminé. S'il existe deux fautes, un courant permanent circule de l'une à l'autre par le sol; l'un des points défectueux prend donc un potentiel positif et l'autre un potentiel négatif; ces potentiels sont en raison des résistances des fautes, ce qui permet de trouver les points du réseau au potentiel nul, qui se trouvent nécessairement entre les fautes considérées.

Mesure de l'isolement des réseaux et localisation des fautes. Méthodes applicables lors d'un arrêt du service. Méthode de la boucle. Méthode de l'auteur. — Lorsqu'un arrêt du service de distribution de l'énergie électrique est possible, on peut appliquer à la recherche des défauts quelques unes des méthodes générales utilisées dans le cas des câbles télégraphiques. Le dérangement qui se produit le plus souvent est une dérivation à la terre.

Nous supposerons qu'aucune partie du réseau n'est raccordée intentionnellement à la terre, un tel raccordement existant souvent dans les distributions à fils multiples, dont le conducteur neutre est relié au sol, afin de diminuer les troubles apportés par la distribution dans les réseaux téléphoniques. Si une liaison de ce genre existe, une faute importante sur l'un des autres câbles occasionne immédiatement la production d'un courant excessif qui fait fondre les sûretés protégeant la partie défectueuse. Dans le cas où une connexion du fil neutre avec le sol a été faite à l'usine, on la rompt au moment de l'essai.

On commence par mesurer l'isolement du réseau. Quand il s'agit de petits réseaux, tels que les distributions intérieures des abonnés, on peut mesurer la résistance d'isolement à l'aide d'un des ohmmètres décrits au chap. XIII, en utilisant une tension au moins équivalente à celle de la distribution. S'il existe une ou plusieurs fautes dans les circuits, l'ohmmètre indique immédiatement leur importance.

Il arrive parfois qu'on ait à localiser une perte à la terre dans une canalisation formée de deux conducteurs bien définis, tels que deux feeders ou deux fils rattachant directement une station génératrice à une station réceptrice. Si l'on peut interrompre le service de ces conducteurs, la méthode de la boucle (chap. XXIX) est applicable.

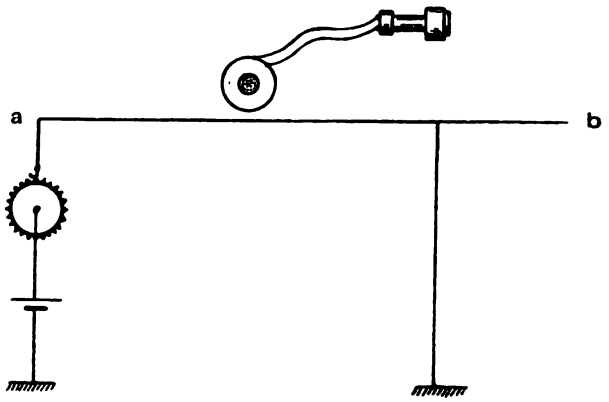


Fig. 175.

L'auteur s'est bien trouvé (1) du procédé suivant, qui permet de localiser aisément un défaut dans une canalisation intérieure (fig. 175).

Supposons, pour plus de simplicité, qu'il s'agisse de rechercher l'emplacement de la perte sur un conducteur *a b* présentant une terre. On isole une des extrémités du fil et l'on relie l'autre extrémité à un interrupteur propre à envoyer sur la section défectueuse des courants intermittents. On suit cette section, à partir de la

(1) *Bull. de l'Académie de Belgique*, 1885.

pile, en présentant normalement au conducteur et le plus près possible de ce dernier une bobine droite à noyau divisé comme celui des petites bobines d'induction. L'enroulement de cette bobine est relié à un téléphone que l'opérateur tient à l'oreille. Les courants intermittents provoquent dans la bobine des courants induits accusés par le téléphone. Au moment où l'on dépasse la section défectueuse, le bruit cesse brusquement. On peut ainsi transporter la bobine parallèlement à la direction de fils placés sous des moulures ou dissimulés dans des cloisons.

Localisation des fautes d'un réseau pendant le service. Méthodes de M. Frisch, de M. Frôlich et de M. Hering. — Dans les distributions, on est le plus souvent obligé de déterminer les dérivations à la terre pendant le service. Fréquemment la mesure se fait par la méthode de M. Frisch, à l'aide d'un voltmètre dont la résistance doit être très supérieure à celle du réseau, de manière à ne pas changer la distribution des potentiels dans les circuits.

Considérons le cas d'une faute de résistance R. Soient V et V′ les potentiels des points de raccordement de la canalisation avec les dynamos. En reliant le voltmètre de résistance r d'une part à la terre, d'autre part au pôle de potentiel V, l'appareil est traversé par un courant qui, si l'on désigne par v le potentiel du câble à l'endroit du défaut, a pour expression

$$i = \frac{V - v}{r + R}.$$

Le nombre de volts marqué par l'instrument est

$$n = ir = \frac{V - v}{r + R} r.$$

En raccordant ensuite le voltmètre au pôle de potentiel V′, on obtient de même

$$n' = i'r = \frac{v - V'}{r + R} r.$$

Enfin, les bornes de l'appareil étant reliées aux deux pôles, celui-ci accuse une tension

$$n'' = V - V'.$$

De là on tire

$$R = \frac{n' r}{n + n'} - r.$$

Le même procédé permet de localiser l'endroit du défaut dans le cas d'un circuit simple, comme celui de la figure 176. Désignons par x et y les résistances des deux tronçons de conducteur séparés

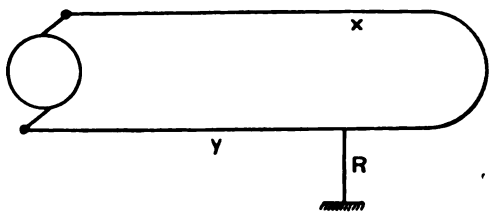


Fig. 176.

par la faute. L'un de ceux-ci peut comprendre un groupe de lampes en série ou en dérivation. Soit I le courant total circulant dans la canalisation. On a, d'après la seconde loi de Kirchhoff, en supposant les courants i et i' qui traversent le voltmètre négligeables devant I,

$$I x - i (r + R) = o,$$

$$I y - i' (r + R) = o,$$

$$\frac{y}{x+y} = \frac{i'}{i+i'}.$$

La détermination de l'isolement par le voltmètre est applicable à un réseau à conducteurs multiples, attendu que la démonstration de cette méthode ne comporte aucune hypothèse quant à la disposition des lampes, qui peuvent être groupées en série, en dérivation ou en circuits mixtes.

La méthode suivante, proposée par M. Frölich pour localiser le défaut, est analogue à celle de la boucle, à cette différence près qu'elle utilise le générateur en service au lieu d'une pile auxiliaire. Des résistances réglables a, b et un galvanomètre sont dérivés aux bornes du générateur (fig. 177). Lorsque l'équilibre du galvanomètre est établi, on a

$$\frac{x}{y} = \frac{a}{b}.$$

La résistance x peut comprendre des lampes en dérivation,

comme l'indique le croquis. Ce dispositif est applicable à la recherche d'un défaut sur l'une des branches d'un réseau à 3 ou à 5 conducteurs, pourvu que le conducteur neutre ne soit pas à la terre.

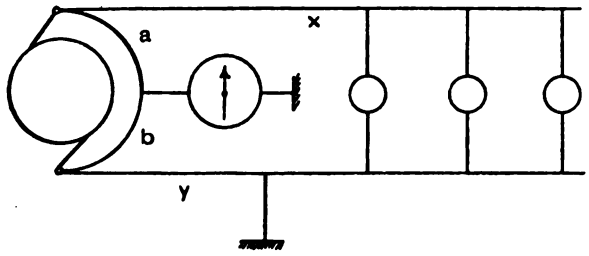


Fig. 177.

Ces méthodes ne permettent pas de localiser très exactement un dérangement, mais simplement de déceler la région où le défaut existe.

Pour préciser l'endroit défectueux, diverses méthodes sont employées. La plus fréquente consiste à constater, à l'aide d'une lampe à incandescence ou mieux d'un voltmètre, les différences de potentiel entre les conducteurs fautifs et la terre, en touchant, dans les boîtes de jonction, d'une part le câble et d'autre part

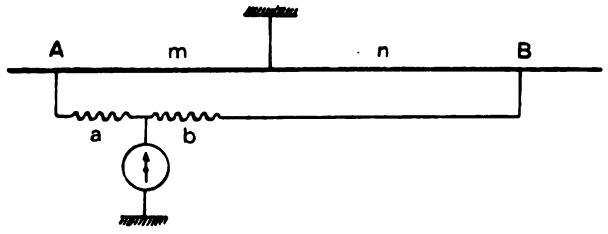


Fig. 178.

son armature ou le tuyau dans lequel il est posé. A mesure qu'on approche du défaut, la différence de potentiel diminue. On peut ainsi déterminer deux boîtes entre lesquelles le défaut existe. Pour trouver exactement la distance de l'une des boîtes au défaut, le procédé suivant, dû à M. Hering, est applicable (fig. 178). On emploie une boîte de résistance raccordée à la section défectueuse A B, en se servant, pour la liaison avec l'extrémité B, d'un fil auxiliaire qui peut être un fil pilote, et l'on constitue un pont de

Wheatstone avec les deux tronçons de câble m, n, séparés par la faute, le circuit auxiliaire a b et un galvanomètre relié au sol. Lorsque le galvanomètre est en équilibre sous l'action du courant de service, on a

$$\frac{m}{a} = \frac{n}{b}.$$

Si l'on a détaché la section défectueuse du réseau, on peut se servir d'une pile d'essai et de deux circuits auxiliaires; un circuit pour les résistances de proportion et un circuit comprenant le galvanomètre (fig. 179).

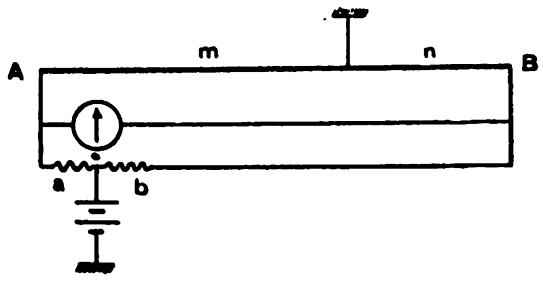


Fig. 179.

Dans ces deux dispositifs, il est possible de substituer un téléphone au galvanomètre, si l'on intercale dans la diagonale correspondante un interrupteur.

Indicateurs de terre et dispositifs automatiques pour la localisation des fautes dans les réseaux en service. — Dans les réseaux électriques peu étendus, on adopte souvent le dispositif suivant, propre à accuser immédiatement un défaut d'isolement. Soient deux conducteurs en relation avec les deux pôles d'un générateur développant une différence de potentiel constante (fig. 180). Deux lampes à incandescence, L et L', réglées chacune pour cette tension, ne fournissent, quand elles sont disposées en série comme l'indique le croquis, qu'une lumière rougeâtre de faible intensité. Le fil de jonction des lampes est relié à la terre par l'intermédiaire d'une sonnerie trembleuse, mise en dérivation sur une résistance non inductive pour éviter les fortes étincelles d'extra-courant.

Dès qu'un défaut d'isolement sérieux se produit dans la canalisation, la sonnerie entre en activité, grâce au courant de perte:

celui-ci, traversant l'une des lampes, lui donne un éclat supérieur à celui de la lampe voisine. Dans le cas d'un contact du conducteur supérieur avec la terre, c'est la lampe L dont la lumière devient la plus vive.

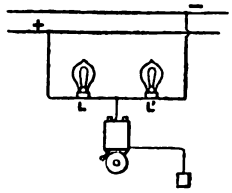


Fig. 180.

Souvent, on se contente d'une seule lampe témoin, dont une des bornes est reliée convenablement à la terre et qu'un commutateur permet de raccorder successivement aux deux pôles des générateurs. L'éclat de la lampe est différent pour les deux positions, si le circuit présente une terre accidentelle.

Lorsque les conducteurs sont alimentés par des courants alternatifs de haute tension, on peut appliquer la méthode précédente en substituant à la lampe la bobine à fil fin d'un transformateur réducteur, dont l'enroulement à gros fil est fermé sur une lampe ou sur un voltmètre Cardew.

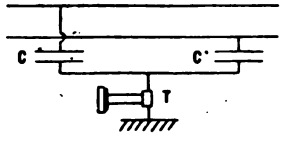


Fig. 181.

M. Picou a imaginé un autre dispositif applicable aux circuits à courants alternatifs. Les deux conducteurs de la distribution sont réunis à des condensateurs formés de deux plaques (fig. 181). Les armatures libres communiquent avec un téléphone relié à la terre. Le fil de jonction est parcouru par des courants alternatifs ; le téléphone l'est également s'il se déclare une terre dans le circuit. L'appareil est à indications continues et le bruit du téléphone peut être rendu assez intense pour être entendu à distance.

Les moyens précédents ne conviennent pas pour les réseaux

étendus, qui présentent toujours des pertes plus ou moins importantes et qui exigent une localisation rapide des défauts lorsque ceux-ci sont graves.

Dans le réseau urbain de Berlin, on a adopté des dispositions automatiques propres à déceler immédiatement une perte importante à la terre et à localiser cette perte (fig. 182). Indépendamment du réseau général d'alimentation des récepteurs, on a constitué de petits réseaux partiels, au moyen de fils pilotes enfermés dans les

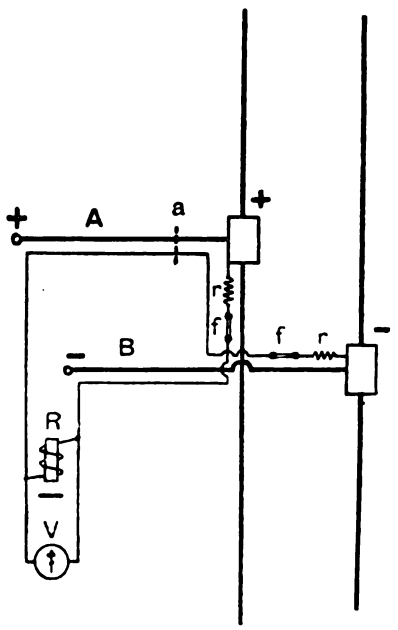


Fig. 182.

câbles et séparés de ceux-ci par une légère couche isolante. Le fil pilote d'un câble positif A est connecté dans la boîte de jonction à la borne négative par l'intermédiaire d'une résistance *r*, destinée à diminuer éventuellement la différence de potentiel entre le câble et un plomb fusible *f*. Inversement, le fil pilote du câble négatif correspondant est relié à la borne positive de la boîte.

A l'usine électrique, ces fils pilotes sont raccordés à un voltmètre ainsi qu'à un relais R. Si un défaut d'isolement se produit en *a*, par exemple, un courant intense naît entre le fil pilote négatif et le

câble positif, ce qui amène la fusion du plomb qui protége le fil pilote. Les deux bornes du relais sont alors ramenées sensiblement au même potentiel; l'armature rendue libre ferme le circuit d'une sonnerie d'avertissement, faisant ainsi connaître la partie du réseau dans laquelle le défaut s'est produit.

Pour localiser le défaut, le système suivant est adopté dans les réseaux à trois conducteurs (fig. 183). Le conducteur neutre de la distribution est pourvu d'un fil pilote, relié d'une part à la terre par

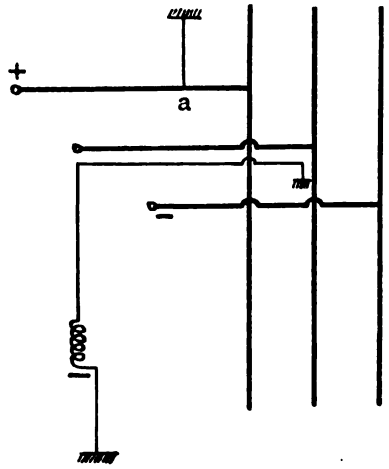


Fig. 183.

sa connexion avec l'armature du câble, et d'autre part à un relais dont la seconde borne est aussi à la terre. Si une dérivation au sol se produit en *a*, par exemple, la terre et l'armature du câble prennent, au voisinage du défaut, un potentiel positif suffisant pour provoquer dans le fil pilote un courant capable d'attirer la palette du relais et de mettre ainsi une sonnerie en jeu. A l'aide d'un galvanomètre substitué au relais, on détermine alors la différence de potentiel et partant l'importance du défaut. En multipliant suffisamment les fils d'épreuve, on peut déterminer sur quelle section d'un câble se trouve le défaut. On applique ensuite une méthode semblable à celle de M. Hering pour préciser l'endroit du dérangement.

Chapitre XXXI.

PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

Mesure de la force électromotrice. — Une pile est définie, au point de vue électrique, par sa force électromotrice et sa résistance intérieure. C'est abusivement qu'on appelle ces quantités *constantes* de la pile, attendu qu'elles ne peuvent avoir de signification précise que pour un régime déterminé du courant et une durée donnée de passage de celui-ci. Les phénomènes qu'on désigne sous le nom de polarisation ont pour effet de modifier la force électromotrice et la résistance intérieure des couples voltaïques dans des rapports encore mal définis. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant de voir que si, à circuit ouvert, l'essai de la force électromotrice donne des résultats concordants, qui ont permis d'adopter certaines piles comme étalons de force électromotrice, la mesure de la force électromotrice à circuit fermé et de la résistance intérieure conduisent à des valeurs qui diffèrent suivant les régimes de courant auxquels les couples sont soumis pendant les essais. Alors qu'on est en droit d'exiger une grande approximation pour la mesure de la force électromotrice des piles à circuit ouvert, le 0,001 pour l'élément Clark par exemple, on ne peut

atteindre qu'une concordance beaucoup moins satisfaisante dans l'essai des piles à circuit fermé.

Nous avons étudié, à l'occasion de la mesure des potentiels, un certain nombre de méthodes applicables à la détermination de la force électromotrice des piles, entr'autres la méthode de l'électromètre, celle du galvanomètre balistique, celle du voltmètre, celles de Poggendorff, de Lacoine, de Clark et de Feussner. Dans la plupart de ces méthodes, il est possible de ne faire débiter à la pile étudiée qu'un courant extrêmement faible ou nul, de sorte que, dans ces conditions, le résultat peut être considéré comme la valeur de la force électromotrice de la pile à circuit ouvert.

Mesure de la résistance intérieure d'une pile. Méthode des déviations réduites. — La quantité à mesurer dépend de l'intensité du courant fourni par la pile. Il faut donc chercher à donner au courant des valeurs qui ne s'écartent pas trop de celles que la pile est appelée à produire dans les applications auxquelles on la destine.

La méthode des déviations réduites a la plus grande analogie avec la méthode de ce nom appliquée à la mesure de la résistance d'un galvanomètre. On constitue un circuit à l'aide de la pile essayée, d'un galvanomètre shunté, d'une boîte de résistance et d'une clef. ρ étant la résistance de la pile, g la résistance combinée du galvanomètre et du shunt de pouvoir multiplicateur m et r la résistance débouchée dans la boîte, on obtient une déviation α telle que

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{(\rho + g + r)\, m}.$$

Une résistance r' prise dans la boîte donne un courant

$$i' = \frac{\alpha'}{k} = \frac{e}{(\rho + g + r')\, m},$$

si l'on suppose que la force électromotrice de la pile est restée la même dans les deux cas. On ne peut admettre cette hypothèse que si les courants i et i' sont très peu différents et si la clef de circuit

n'est abaissée que pendant le temps strictement nécessaire pour les lectures.

Des deux équations précédentes, on tire

$$\rho = \frac{\alpha'(g + r') - \alpha(g + r)}{\alpha - \alpha'}.$$

Si l'on conduit la discussion comme dans la méthode appliquée au galvanomètre, on trouve que la plus grande exactitude est atteinte en réduisant autant que possible la résistance r, de manière à accroître α, et en choisissant r' de façon à obtenir, dans la seconde expérience, une déviation moitié moindre que α. Toutefois, les considérations exposées plus haut ne permettent pas de faire descendre la résistance des parties métalliques du circuit en dessous d'une certaine limite, égale au moins à la résistance de la pile avec les couples du genre Daniell et très supérieure à cette valeur avec les piles très polarisables, comme l'élément Leclanché.

Lorsqu'on effectue la mesure avec un galvanomètre sensible, on applique aux bornes de ce dernier un shunt qui rend g négligeable devant r et r'.

Méthode des déviations égales. — La méthode est analogue à celle exposée au sujet des galvanomètres.

On met en circuit un galvanomètre shunté au $m^{ième}$, de résistance combinée g, une boîte de résistance r et une pile e, ρ, shuntée par une résistance s.

On a, en choisissant les valeurs de s et r de manière à obtenir la déviation la plus grande possible,

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{\rho + \dfrac{s(g + r)}{s + g + r}} \times \frac{s}{g + s + r} \times \frac{1}{m}.$$

On supprime le shunt s et l'on débouche dans la boîte une résistance r' reproduisant la déviation α; il vient

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{e}{\rho + g + r'} \times \frac{1}{m};$$

d'où

$$\rho = \frac{s\,(r' - r)}{r + g}.$$

Les réserves faites à propos de la méthode précédente doivent être prises en considération lorsqu'on discute la méthode des déviations égales. Cette discussion se fait d'ailleurs de la même manière que lorsqu'il s'agit de la résistance des galvanomètres.

Méthode de Mance. — La méthode de Mance présente une grande analogie avec celle de Lord Kelvin. La pile est insérée dans

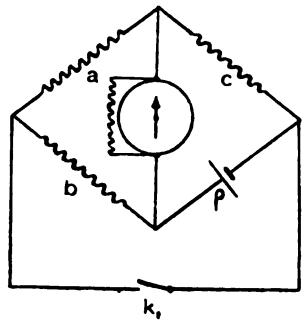


Fig. 184.

la branche inconnue d'un pont de Wheatstone et les résistances a, b, c sont réglées jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre reste constante dans les deux positions de la clef k_1.

On a alors

$$\rho = \frac{bc}{a}.$$

Les conditions du maximum de sensibilité sont analogues à celles de la méthode de Lord Kelvin.

On remarquera que, dans cette méthode, les deux positions de la clef k_1 correspondent à des courants très différents débités par la pile; aussi ne doit-on pas s'attendre à des résultats très précis avec les piles polarisables.

On peut augmenter la résistance à mesurer sans faire croître la force électromotrice en employant $2n + 1$ éléments dont n sont en opposition par rapport à $n + 1$.

Méthode de M. Kohlrausch. — La méthode proposée par ce physicien pour la mesure de la résistance des électrolytes s'applique à la détermination de la résistance d'une pile. Le dispositif à téléphone permet une mesure rapide. Si l'on craint que le courant de la pile ne soit trop fort pour un couple polarisable ou encore, lorsqu'on mesure la résistance intérieure d'accumulateurs dont le courant pourrait détériorer les appareils, on met deux éléments en opposition, de manière à supprimer le courant continu et à ne laisser passer que les courants alternatifs servant à l'essai. On sait les difficultés que la self-induction des branches du pont et la capacité de polarisation des électrodes apportent dans l'exécution de la mesure, mais ces objections n'ont pas ici la même valeur que dans le cas des électrolytes, attendu qu'on ne cherche pas à atteindre une grande précision.

La méthode de M. Kohlrausch offre cette particularité de donner pour la résistance intérieure de la pile des valeurs indépendantes de la force électromotrice des couples et qui ne sont pas, par suite, entachées des erreurs qu'amènent, dans les autres méthodes, les variations de celle-ci.

Méthode de M. Uppenborn. — M. Uppenborn a modifié la méthode de M. Kohlrausch, de manière à permettre la mesure de

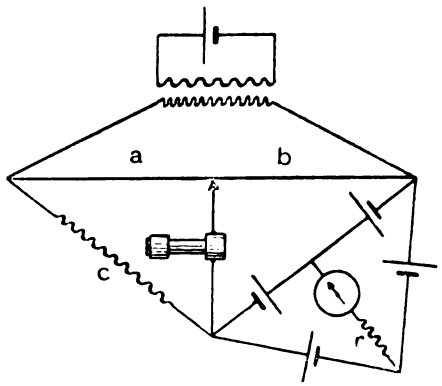


Fig. 185.

la résistance intérieure des piles ou des accumulateurs sous divers régimes de courant.

On remplace le couple unique par quatre éléments, disposés en opposition par rapport au pont et groupés par deux en série et deux en dérivation sur une résistance variable r, mise à la suite d'un ampèremètre (fig. 185).

En modifiant r, on fait produire aux éléments des courants différents. On mesure en même temps, par le dispositif de M. Kohlrausch, la résistance combinée des quatre couples, qui est égale à celle d'un seul élément. Ni l'ampèremètre ni r ne sont traversés par les courants alternatifs.

Méthode de M. Boccali. — M. Boccali a aussi modifié la méthode de M. Kohlrausch, en vue de mesurer la résistance intérieure d'un accumulateur pendant la charge et pendant la décharge.

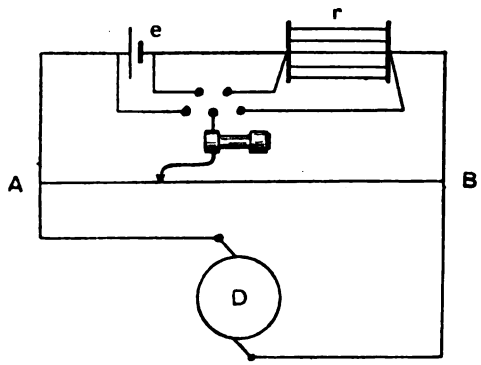


Fig. 186.

L'accumulateur e et la dynamo de charge D sont mis en série avec une résistance r formée de barres groupées en parallèle. Un fil calibré AB est placé en dérivation. Les variations de courant dues au passage des balais de la dynamo sur les lames du collecteur suffisent pour faire vibrer le diaphragme téléphonique, tant que l'équilibre n'est pas réglé. Pour éliminer les résistances des fils de connexion, qui ne sont pas négligeables devant celle de l'élément secondaire, on fait quatre mesures en raccordant le téléphone aux quatre contacts indiqués

Pour déterminer la résistance de l'élément secondaire pendant la

décharge, on remplace la dynamo par un interrupteur à manivelle produisant, dans le courant de décharge, des variations suffisantes pour agir sur le téléphone.

La méthode précédente peut aussi être employée pour mesurer la résistance d'une lampe à arc pendant son fonctionnement. Comme la tension en AB est alors élevée, on substitue au fil divisé une résistance liquide.

Méthode par le voltmètre. — On adopte souvent la méthode suivante, qui a l'avantage de la rapidité.

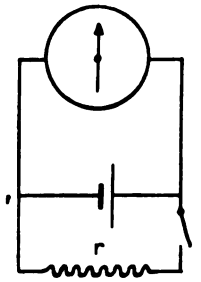


Fig. 187.

On mesure la force électromotrice e à circuit ouvert à l'aide d'un galvanomètre employé comme voltmètre; puis on met la pile en circuit avec une résistance connue r. La différence de potentiel aux bornes e', accusée alors par le voltmètre, est, dans l'hypothèse où la force électromotrice de la pile n'a pas changé,

$$e' = e\,\frac{r}{r+\rho}.$$

On tire de là

$$\rho = r\,\frac{(e-e')}{e'} = \frac{r\,(\alpha-\alpha')}{\alpha'}.$$

Pour que la force électromotrice ne soit pas altérée, il faut que le galvanomètre soit à indications rapides et que la résistance extérieure ne soit pas trop faible. Si l'on discute la méthode sans se soucier de la polarisation, on trouve que l'erreur de lecture a la moindre influence lorsque r est voisin de ρ; mais, avec les piles très polarisables, on obtient dans ces conditions des valeurs beaucoup trop fortes pour la résistance intérieure.

Lorsqu'on ne connaît pas la résistance r, on peut mesurer le courant i qui la traverse à l'aide d'un ampèremètre.

La relation est alors

$$i = \frac{e}{r+\rho} = \frac{e'}{r} = \frac{e-e'}{\rho},$$

d'où

$$\rho = \frac{e-e'}{i}.$$

Méthode de Munro. — La méthode de Munro, susceptible de beaucoup de variantes, s'applique surtout aux piles polarisables.

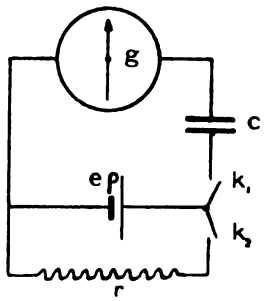


Fig. 188.

Un condensateur c est disposé à la suite d'un galvanomètre balistique g. Par l'abaissement de la clef k_1, on charge le condensateur d'une quantité d'électricité

$$q = \frac{\alpha}{K} = ce,$$

c étant la capacité du condensateur, e la force électromotrice de la pile et K la constante balistique du galvanomètre. En abaissant la clef k_2, on décharge partiellement le condensateur, dont la charge est alors réduite à

$$q' = ce' = ce\,\frac{r}{r+\rho}.$$

Le galvanomètre est traversé par la quantité d'électricité déchargée

$$q - q' = \frac{\alpha'}{K} = \frac{\alpha}{K}\left(1 - \frac{r}{r+\rho}\right);$$

on tire de cette équation

$$\rho = \frac{r\,\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

Dans cette méthode, on suppose que la force électromotrice de la pile n'a pas changé au moment de la fermeture de la clef k_2.

Chapitre XXXII.

ACCUMULATEURS.

Objet des essais. — Outre la détermination de la force électromotrice et de la résistance intérieure qui s'effectue par les méthodes signalées dans les chapitres précédents, en ayant égard aux courants élevés que peuvent produire les piles secondaires, celles-ci comportent des mesures de capacité voltaïque, d'énergie emmagasinée, de rendement en quantité et de rendement en énergie, sous divers régimes de courant. En vue de rendre les résultats comparables, on rapporte ordinairement la capacité, l'énergie et la puissance d'un élément secondaire au kilogramme de plaques contenues dans celui-ci.

Pour estimer ces quantités, on relève, pendant la charge comme pendant la décharge, et à des intervalles de temps suffisamment rapprochés pour observer leurs variations, la différence de potentiel et l'intensité du courant.

On dresse des courbes dont les abscisses représentent les temps et les ordonnées les valeurs de la différence de potentiel, du courant et de la puissance correspondant aux diverses observations. Ces courbes permettent de déterminer, à l'aide du planimètre par exemple, les

quantités d'électricité absorbée et rendue par la pile, ainsi que l'énergie dépensée et l'énergie recueillie. On déduit de là le rendement en quantité et le rendement en énergie.

Il faut se garder de considérer comme puissance moyenne le produit de la différence de potentiel moyenne par l'intensité moyenne du courant; mais on doit prendre la moyenne des produits des tensions par les courants correspondants.

Pour faciliter les observations, on peut se servir utilement d'appareils enregistreurs. Un ampèremètre enregistreur fait connaître la capacité utile et le rendement en quantité. Il est à remarquer qu'un compteur Aron peut également fournir ces éléments : la quantité d'électricité emmagasinée et la quantité rendue se traduisent par des indications inverses au totaliseur, lequel, à la fin de la décharge, renseigne la différence entre les coulombs absorbés et les coulombs restitués.

En utilisant un ampèremètre et un voltmètre enregistreurs, on peut relever les éléments nécessaires pour déterminer l'énergie emmagasinée et le rendement en énergie.

Un wattmètre enregistreur fournit plus directement encore ces dernières quantités.

On se rappellera que le rendement d'un accumulateur dépend en grande partie des états de service antérieurs de l'élément. Ainsi, lorsqu'après avoir surchargé un couple secondaire, on le décharge jusqu'à ce que la différence de potentiel tombe à la limite inférieure normale, on peut trouver qu'une charge et une décharge normales, faites ensuite, donnent un rendement en quantité supérieur à 100 pour 100, la seconde décharge restituant une partie de l'énergie dépensée dans la première charge.

Pour obtenir des résultats ayant une valeur sérieuse aux yeux des gens compétents, il est indispensable de commencer par faire subir au couple une série ininterrompue de charges et de décharges poussées jusqu'aux mêmes limites de différence de potentiel. Si l'accumulateur a été antérieurement trop chargé, on constate que les rendements vont en décroissant jusqu'à une valeur constante. Lorsqu'il a été trop déchargé ou lorsqu'il a été abandonné pendant quelque temps à lui-même, on reconnaît, au contraire, que les essais successifs donnent des rendements croissant jusqu'à cette

même valeur constante, qui constitue le rendement vrai. Les essais électriques des accumulateurs sont toujours complétés par des essais densimétriques destinés à montrer les variations de poids spécifique du liquide des éléments pendant la charge et la décharge.

Chapitre XXXIII.

GÉNÉRATEURS ET MOTEURS A COURANT CONTINU.

Établissement d'un laboratoire de mesures industrielles. — Si l'on veut installer un laboratoire permettant des mesures industrielles très précises des machines dynamo-électriques, il faut, autant que possible, l'établir à l'écart des champs magnétiques créés par les dynamos et des grandes masses de fer mobiles, telles que les locomotives, afin que les appareils employés dans les mesures ne soient pas influencés. Les câbles amenant des courants intenses dans le laboratoire seront concentriques ou tordus, de manière à neutraliser l'action magnétique des deux fils. On disposera d'une batterie d'accumulateurs assez puissante pour produire des courants constants, utilisés à l'étalonnage des appareils et à l'essai des dynamos.

La détermination de l'intensité et de la différence de potentiel, dans le cas des courants continus, peut se faire d'une manière très exacte par le secours des galvanomètres à réflexion gradués, comme ampèremètres et comme voltmètres, par les méthodes que nous avons décrites et parmi lesquelles nous rappellerons les méthodes de compensation de Feussner et du potentiomètre, les balances électrodynamiques et les pesées voltamétriques.

Parmi les appareils à réflexion, les plus convenables sont ceux du type Deprez et d'Arsonval, sur lesquels les champs magnétiques extérieurs ont peu d'influence, de même que les variations du champ terrestre, et qui permettent des lectures rapides.

Lorsqu'on utilise des appareils à réflexion, il convient de les établir sur une base bien stable, ce qui n'est pas toujours facile à réaliser dans le voisinage des ateliers industriels. Si des consoles, fixées aux murs principaux du laboratoire, n'offrent pas une stabilité suffisante, on peut supporter les appareils par des blocs de maçonnerie descendant jusqu'au bon sol et écartés, par un intervalle d'air, des terres ou des constructions voisines. Parfois ce moyen est insuffisant; il est toujours assez coûteux et l'on peut y substituer les artifices suivants.

Les appareils à réflexion, ainsi que leurs échelles, sont placés sur un bloc de pierre, épais de 15 à 25 cm, reposant par une saillie sur une masse de déchets de laine ou de coton empilés dans une caisse en bois ou en maçonnerie. Les vibrations du sol s'amortissent dans la laine et ne peuvent mettre en mouvement la masse de pierre supérieure.

Un autre moyen consiste à supporter, par quatre fortes lanières de caoutchouc, quatre ressorts à boudin ou quatre chaînes, un bloc de pierre ou une épaisse plaque de plomb soutenant l'appareil qu'on doit soustraire aux vibrations. Celles-ci s'amortissent dans l'intermédiaire élastique ou discontinu.

Dans les usines électriques, on est souvent obligé de se contenter d'appareils moins précis que les instruments à réflexion, par suite de la nécessité d'effectuer les mesures au milieu des machines. On se sert d'appareils à lecture directe qui sont d'ailleurs à peu près les seuls utilisés pour les mesures effectuées sur les alternateurs et les transformateurs. Pour les courants continus, on choisit encore de préférence les appareils basés sur le principe du galvanomètre Deprez et d'Arsonval ou sur la dilatation des fils minces, afin de soustraire autant que possible les instruments à l'action des champs magnétiques extérieurs. Pour les hautes tensions, les voltmètres électrostatiques sont avantageux.

Les appareils à lecture directe doivent être fréquemment étalonnés. Les bons modèles sont susceptibles de donner, dans la

région moyenne de leur échelle, une approximation de 0,5 pour 100, ce qui conduit à une erreur limite de 1 pour 100 dans l'estimation de la puissance électrique déterminée par le produit des lectures de l'ampèremètre et du voltmètre.

Cette exactitude est suffisante lorsqu'on essaie des dynamos conduites par des machines à vapeur dont les irrégularités exposent à des erreurs au moins aussi fortes. L'emploi des appareils à lecture directe est également justifié si l'on fait simultanément la mesure de la puissance mécanique en relevant des diagrammes d'indicateur, car l'évaluation de ces diagrammes entraîne des erreurs au moins du même ordre.

Les appareils à réflexion, susceptibles de donner une approximation de 0,1 pour 100, ne sont vraiment indispensables que pour les essais purement électriques faits sur des dynamos alimentées par des accumulateurs ou conduites par des machines à vapeur d'une régularité exceptionnelle. Ces appareils offrent toutefois l'avantage, même pour les mesures courantes, de permettre de varier les limites de leur emploi dans de larges proportions, par l'usage de shunts et de résistances additionnelles.

L'outillage d'un laboratoire industriel est complété par des caisses de résistance, des ponts de Wheatstone, des rhéostats capables de supporter des courants intenses et une collection de clefs de circuit.

Essais antérieurs à la construction d'une dynamo. — Avant la construction d'une dynamo, il est essentiel de mesurer la conductibilité électrique des fils de cuivre employés dans les enroulements, ainsi que la perméabilité magnétique des métaux constituant la carcasse de la machine. Le fer utilisé pour l'induit doit, en outre, être essayé au point de vue de la perte par hystérésis.

Lorsqu'on étudie un nouveau type de machine, il est nécessaire de déterminer la distribution du flux magnétique, afin de calculer le coefficient de perte de flux entrant dans l'équation du circuit magnétique, établie suivant la méthode de MM. Hopkinson.

Cette détermination peut se faire avant le bobinage de l'armature. Considérons une machine dont les inducteurs sont formés par un électro-aimant en fer à cheval, dans lequel on distingue les noyaux qu'on entoure de bobines magnétisantes provisoires, la culasse et les pièces polaires. Cet électro-aimant constitue avec son armature

mobile un circuit magnétique traversé par le flux dû à l'action du courant qu'on fait passer dans les bobines. Si *mi* est le nombre d'ampères-tours de celles-ci, la force magnétomotrice est $4\pi mi$.

Le flux est confiné en majeure partie dans la carcasse de la machine; toutefois, comme celle-ci est environnée d'air, de cuivre et d'autres substances perméables dans une certaine mesure aux lignes de force, il s'ensuit des dérivations de flux assez complexes, qui se produisent particulièrement autour de l'induit, entre les pièces polaires. Pour déterminer les pertes de flux correspondant à l'excitation normale de l'électro-aimant, obtenue au moyen d'une source d'électricité indépendante, on enroule autour du milieu d'une des bobines magnétisantes une spire de fil reliée à un galvanomètre balistique. En supprimant brusquement le courant excitateur, on obtient dans le galvanomètre une élongation permettant d'évaluer la quantité d'électricité induite et, par conséquent, la variation du flux magnétique à travers les noyaux. Cette variation représente le flux total diminué du flux remanent. Ce dernier est minime et peut être négligé dans la comparaison qui va suivre.

On répète la même expérience à l'aide de spires enroulées autour de la culasse, des pièces polaires et de l'induit. Les rapports des élongations correspondantes, accusées par le galvanomètre balistique, à celle obtenue dans la première expérience sont égaux aux rapports des flux dans les diverses parties de la machine au flux à travers les noyaux. La variation de surface des spires d'essai est du reste indifférente, si la résistance du circuit de décharge peut être considérée comme constante.

Le rapport entre le flux dans les noyaux et le flux à travers l'induit varie de 1,2 à 2 suivant les types de machines.

Essais effectués après la construction.— Les essais effectués après la construction d'une dynamo comportent la mesure des résistances à chaud et à froid des diverses parties du circuit électrique, la vérification de l'isolement de ces circuits, celle de la répartition des potentiels au collecteur, la détermination des rendements, le relevé de la température limite atteinte après la durée normale de fonctionnement de la dynamo, enfin l'évaluation des pertes intérieures par effet Joule, courants de Foucault, hystérésis et frottements.

Si l'on représente par P la puissance mécanique, en watts, absorbée par l'arbre d'une dynamo génératrice ; par *e* la différence de potentiel utile aux bornes extérieures de la machine, en volts ; par *i* l'intensité du courant dans le circuit extérieur, en ampères ; le rapport $\frac{ei}{P}$ est le *rendement industriel* de la machine. On réserve le nom de *rendement électrique* au rapport de la puissance électrique utile, *ei*, à la puissance électrique totale fournie par la dynamo et représentée par le produit de la force électromotrice totale de l'induit par le courant qui traverse ce dernier. On voit que le rendement industriel, le seul qui intéresse celui qui emploie la dynamo, est inférieur au rendement électrique, puisque ce dernier ne tient compte ni des pertes intérieures dues aux courants de Foucault et aux effets d'hystérésis, ni des frottements des pièces mobiles contre les coussinets et contre l'air.

Mesure des résistances électriques d'une dynamo. — Il convient de mesurer les résistances électriques des diverses parties d'une dynamo d'abord à froid, puis à chaud, après que la dynamo a pris sa température de régime, qui est ordinairement atteinte après six heures de fonctionnement en pleine charge. La résistance à chaud doit être déterminée pour permettre l'évaluation des pertes par effet Joule de la machine en service normal.

Les parties du circuit électrique qui présentent une résistance assez élevée, comme l'enroulement des inducteurs d'une machine en dérivation, peuvent être mesurées à l'aide d'un pont de Wheatstone. Les parties de résistance faible sont mesurées avec plus d'exactitude par le pont de Kelvin ou par une méthode analogue.

Le plus souvent, on envoie dans la résistance à mesurer le courant d'une batterie d'accumulateurs et l'on prend le rapport des indications d'un voltmètre et d'un ampèremètre mesurant la différence de potentiel aux bornes du circuit essayé ainsi que l'intensité du courant. Ces appareils sont moins exposés aux accidents, dus aux fausses manœuvres de commutateurs, que les ponts composés de fils fins, qu'une élévation brusque du courant peut mettre hors de service.

Un autre moyen employé pour la détermination des résistances faibles consiste à faire le rapport des lectures relevées sur l'échelle

d'un galvanomètre de grande résistance, relié successivement aux bornes du circuit à l'essai et aux bornes d'une résistance étalon, traversée par le même courant.

La mesure de la résistance d'un induit exige certaines précautions. Il convient de comprendre dans cette résistance celle des balais, dont le contact avec le collecteur occasionne parfois une chute de tension notable, surtout avec les balais en charbon ; ce fait doit être pris en considération dans l'évaluation des pertes par effet Joule. Il faut répéter la mesure pour diverses positions occupées par les balais sur le collecteur, les ressorts de pression étant réglés à la tension normale ; on prend la moyenne des résultats obtenus.

On doit vérifier la résistance d'isolement de la machine après échauffement de celle-ci à la température de régime. Pour cela, on adopte l'une des méthodes suivies pour la mesure des hautes résistances, en appliquant une tension d'essai égale au moins au double de la tension de régime de la dynamo. Dans le cas de machines développant de hautes tensions, il est nécessaire de recourir à l'emploi de petits transformateurs ou de petites dynamos continues de haut voltage pour cette vérification. Une tension d'essai élevée met en évidence des défauts que n'accuse pas une tension réduite. Souvent, les dynamos nouvellement construites présentent un isolement faible à cause de l'humidité qui imprègne les isolants. On peut les sécher soit à l'étuve, soit par un courant électrique obtenu en excitant séparément la machine et en la faisant tourner lentement dans un circuit peu résistant, de manière à ne lui faire produire qu'une force électromotrice réduite.

Répartition des potentiels au collecteur. — Pendant la rotation de l'induit d'une dynamo bipolaire, les potentiels des lames du collecteur vont en croissant des deux côtés de la ligne neutre, à partir du balai négatif jusqu'au balai positif. Supposons le balai négatif maintenu au potentiel zéro par une liaison électrique avec le sol, tandis que le balai positif est isolé, et portons sur le prolongement des rayons du collecteur, passant par les diverses lames, des longueurs proportionnelles aux potentiels de celles-ci, nous obtiendrons une courbe du genre de celle représentée dans la fig. 189, comprenant deux branches symétriques par rapport à la ligne

neutre de la machine. Pour déterminer rapidement les points de la courbe, le balai négatif est relié à l'une des bornes d'un voltmètre dont la seconde borne communique avec un petit balai auxiliaire. On appuie ce dernier sur le collecteur en l'écartant progressivement du balai négatif et en réglant les écarts de manière à insérer successivement les diverses sections de l'induit dans le circuit du voltmètre. Les déviations de celui-ci accusent les

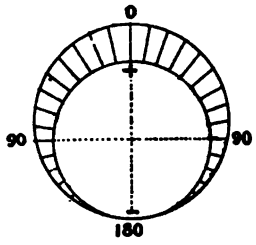


Fig. 189.

différences de potentiel entre le balai négatif et les lames du collecteur et mesurent les ordonnées de la courbe polaire ci-dessus. Cette méthode permet de vérifier la symétrie du champ magnétique dans lequel se meut le fil induit. Un défaut de symétrie est immédiatement accusé par une déformation de la courbe des potentiels.

La même méthode appliquée à un induit multipolaire enroulé en quantité permet de vérifier si les divers enroulements dérivés développent les mêmes forces électromotrices. Très souvent, en effet, par suite d'une différence entre les inducteurs ou d'un décentrage de l'induit, on constate des inégalités entre les forces électromotrices susceptibles de produire des courants dans l'induit tournant à circuit ouvert, avec les bornes de même polarité réunies. On constate ces inégalités en reliant deux balais de même polarité par un ampèremètre, qui accuse le courant dû à la différence de potentiel de ces balais.

On peut vérifier directement l'inégalité des flux inducteurs correspondants en se servant, d'après la méthode de M. Hopkinson, d'un galvanomètre balistique relié à une spire de fil qu'on enroule successivement autour des divers noyaux. Parfois l'inégalité d'action des inducteurs tient à des différences dans les ampères-

tours des divers électro-aimants. On peut comparer rapidement les chutes de potentiel dans les diverses bobines excitatrices, si celles-ci sont réunies en série, et constater ainsi immédiatement une différence saillante entre ces bobines.

Mesures thermométriques. — Par l'effet des courants intenses et des variations magnétiques de l'induit, les machines s'échauffent en sorte que la résistance des conducteurs croît progressivement pendant le fonctionnement jusqu'à une valeur de régime qui n'est généralement atteinte qu'après plusieurs heures.

On détermine approximativement la température des inducteurs, pendant la marche, en appliquant sur ceux-ci la boule d'un thermomètre qu'on protège par du coton contre le rayonnement.

Si l'on emploie ce procédé pour relever la température du fil induit au moment de l'arrêt, il est nécessaire de chauffer au préalable le thermomètre jusqu'aux environs de la température limite tolérée, laquelle dépasse ordinairement de 30° à 50° la température ambiante. On remarque, en effet, qu'après l'arrêt de l'armature la température du fil induit s'élève pendant 10 à 15 minutes, car la cessation du courant d'air occasionné par la rotation diminue la dissipation par convection de la chaleur intérieure de l'armature. Si donc on doit laisser le thermomètre trop longtemps sur l'induit, on constate non pas la température à l'arrêt, mais une température qui peut être notablement supérieure à cette dernière.

Pour apprécier très rapidement l'échauffement des conducteurs, on peut encore comparer les résistances du circuit de l'induit à chaud et à froid, et déduire l'élévation de température du coefficient de variation de la résistibilité du métal, indiqué par les tables. Ce procédé donne la température moyenne de la masse du fil et non la température extérieure.

Détermination directe du rendement d'une dynamo par la combinaison de mesures mécaniques et de mesures électriques. Lorsqu'on se trouve en présence d'une dynamo conduite par une machine à vapeur, et qu'on ne dispose pas de générateur électrique auxiliaire, on n'a d'autre moyen, pour déterminer le rendement industriel, que de mesurer, par des essais mécaniques,

la puissance effective appliquée à l'arbre de la dynamo en même temps qu'on estime les watts disponibles à ses bornes.

Le travail mécanique absorbé par la dynamo est déduit des diagrammes d'indicateur relevés sur la machine à vapeur. On a vu précédemment qu'eu égard aux faibles différences entre les frottements d'une machine à vapeur en charge et à vide, on peut admettre dans un essai approximatif que le travail effectif d'une telle machine est égal à la différence entre le travail indiqué en charge et le travail indiqué à vide pour une même vitesse. Si la machine à vapeur attaque indirectement la dynamo, on peut encore considérer, dans une première approximation, que les frottements des organes intermédiaires sont indépendants de la charge. Il est bien entendu que la vitesse doit être constante pendant ces essais, ainsi que la lubrification des organes mobiles. On attendra que les machines aient tourné pendant un temps suffisant pour que les graisses et huiles employées aient pris leur fluidité normale, ces graisses offrant parfois à froid une résistance très supérieure à la résistance en pleine marche. L'importance de la constance de la vitesse est particulièrement grande dans la marche à vide; eu égard au faible travail effectué dans ces conditions, le volant apporte, pendant un ralentissement d'allure, un appoint important au travail de la vapeur et, au contraire, lors d'une accélération de vitesse, la vapeur doit fournir, outre le travail des frottements, le travail, souvent plus important, nécessaire pour vaincre l'inertie du volant.

On obtient une mesure plus exacte du travail réellement utilisé par la dynamo en substituant à celle-ci un frein qui absorbe le travail de la machine à vapeur, dans les mêmes conditions d'admission et de vitesse.

Les dynamomètres de transmission offrent un autre moyen de mesurer le travail transmis.

Eu égard à la difficulté de séparer exactement les pertes dans le moteur des pertes dans la dynamo, on convient souvent, dans le cas du couplage direct, de ne mesurer que le rapport de la puissance électrique utile à la puissance indiquée aux cylindres du moteur. Ce rapport est le *rendement combiné* des deux machines.

S'il s'agit de dynamos attaquées par des turbines à eau ou à vapeur, on détermine l'eau ou la vapeur dépensée, sous la pression indiquée, par kilowatt-heure utile recueilli aux bornes de la dynamo.

Les mesures électriques qui accompagnent les mesures mécaniques sont la détermination du voltage aux bornes de la dynamo, la mesure de l'intensité du courant utile et, éventuellement, le relevé de l'intensité du courant dans le circuit dérivé des inducteurs. La machine est mise en circuit avec des résistances telles que des lampes à incandescence ou les résistances artificielles pour courants intenses décrites précédemment.

Si l'on est obligé de faire l'essai pendant que la dynamo alimente des moteurs électriques ou d'autres récepteurs à marche variable, il convient, pour obtenir quelque précision, de faire de nombreuses expériences permettant de prendre des moyennes.

Les essais à l'indicateur, au compte-tours, au voltmètre et à l'ampèremètre doivent être simultanés, afin de donner la puissance utile et la puissance absorbée correspondantes. Un observateur relève par exemple la vitesse et frappe sur un timbre au moment où le régime normal est atteint. Aussitôt, d'autres observateurs font, en même temps, les constatations électriques et mécaniques.

La mesure de la vitesse est une de celles qui entraînent les erreurs les plus fortes, si l'on borne l'observation à une période trop courte. On obtient de bons résultats, avec les machines à vapeur de faible et de moyenne vitesse, en fixant un compte-tours à l'arbre et en notant le nombre de révolutions pendant toute la durée de la série d'essais effectués sous un même régime de charge. En divisant ce nombre par le temps, on obtient la vitesse moyenne plus exactement qu'en appliquant un compte-tours à pointeau pendant une minute sur l'extrémité de l'arbre.

Pour l'essai d'une dynamo, il est bon d'établir successivement divers régimes de courant, en maintenant la vitesse invariable et en changeant la résistance extérieure. Pour chaque valeur nouvelle du courant, on fait des lectures, également espacées, à chacun des appareils de mesure électrique, pendant qu'on relève les diagrammes d'indicateur, afin de pouvoir calculer la puissance électrique moyenne correspondant à la puissance mécanique. Il est d'ailleurs utile de répéter plusieurs fois l'ensemble des essais pour chaque régime, afin de prendre des moyennes et de réduire les erreurs accidentelles assez grandes auxquelles de telles observations sont sujettes.

On termine la série des mesures en relevant la puissance absorbée pour faire tourner la dynamo avec son excitation seule. On a ainsi toutes les données nécessaires pour établir les courbes de variation du rendement industriel ou du rendement combiné en fonction de la puissance utile.

Cette méthode de mesure du rendement d'une dynamo est sujette, il ne faut pas se le dissimuler, à des causes d'erreur assez grandes. Les essais mécaniques ne comportent généralement pas la même précision que les mesures électriques, et la puissance absorbée étant obtenue par différence entre la puissance en charge et la puissance à vide, des erreurs de sens opposés sur les quantités précédentes peuvent apporter dans l'estimation de la différence une erreur importante. On ne s'étonnera pas de trouver des différences de 2 pour 100 entre des mesures de cet ordre effectuées avec des appareils différents par divers observateurs. Lorsqu'on étudie le rendement combiné d'un moteur à vapeur et d'une dynamo, on peut obtenir plus de précision, d'autant plus qu'on a un contrôle en déterminant le poids de vapeur dépensée par kilowatt-heure utile.

Pour atteindre une exactitude plus grande, on peut, lorsqu'on dispose d'une source d'électricité indépendante, admettre l'égalité des rendements d'une dynamo fonctionnant successivement comme générateur et comme moteur, hypothèse sensiblement exacte lorsqu'on n'a pas affaire à de très petites machines. Il suffit d'un essai au frein de Prony pour obtenir le rendement industriel d'un électromoteur, rendement qui est égal au rapport entre la puissance restituée à la poulie et la puissance électrique absorbée.

On remarquera qu'un générateur dont le rendement industriel a été déterminé au préalable dans diverses conditions de vitesse, de courant et de différence de potentiel aux bornes constitue un excellent frein pour l'étude des moteurs électriques et autres, car il suffit d'une lecture à l'ampèremètre et au voltmètre pour estimer la puissance absorbée par ce frein. Une dynamo peut d'ailleurs fonctionner indéfiniment, tandis qu'un frein ordinaire exige des soins particuliers qui rendent difficiles les expériences de longue durée. Les petites dynamos ne sont pas à recommander comme freins, par suite de la proportion relativement grande du

travail absorbé par les frottements des balais et des tourillons, frottements susceptibles de varier dans des limites assez étendues, suivant la pression des balais et le graissage. Pour les puissances faibles, on a construit des freins constitués par des dynamos sans balais dont l'induit est un disque de cuivre. On mesure le couple résistant de ces freins électriques en rendant les inducteurs mobiles autour d'un axe et en équilibrant le couple qui tend à entraîner ceux-ci dans le mouvement de l'induit par des poids, comme dans le frein de Prony.

La fig. 190 montre le dispositif de M. Pasqualini, dans lequel un disque en cuivre tourne devant les pôles d'un inducteur monté sur un axe mobile. L'extrémité de ce dernier soutient un volant de grand moment d'inertie dont la position est repérée sur une graduation et qui porte deux règles horizontales, le long desquelles on peut déplacer des poids qui permettent de varier et d'estimer le couple résistant.

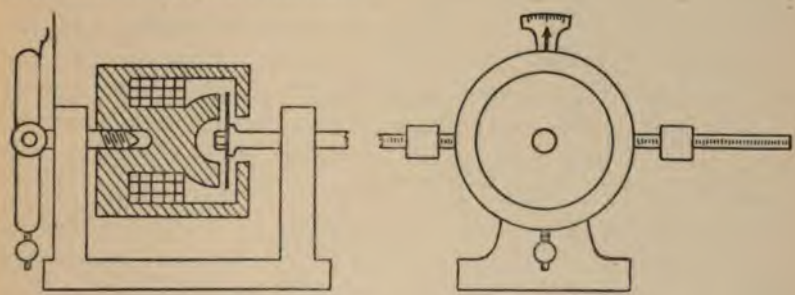


Fig. 190.

Un dernier moyen employé pour estimer la puissance absorbée par une dynamo génératrice a été indiqué par MM. Marcel Deprez et Smith. Il consiste à faire de la machine son propre dynamomètre, en supportant les extrémités de l'arbre de l'induit entre des pointes ou dans des coussinets supplémentaires, de manière à rendre mobile dans l'espace le massif des inducteurs tournant à frottement sur l'arbre. Le couple exercé entre l'induit et les inducteurs s'estime en l'équilibrant par des poids ou mieux à l'aide d'une balance à ressort agissant sur un bras de levier mesurable. Ce procédé peut aussi être appliqué à un électromoteur pour déterminer la puissance mécanique développée par

ce dernier. Les frottements des paliers occasionnent toutefois des erreurs assez notables dans les résultats, car on ne peut en tenir compte.

Les méthodes permettant de mesurer le rendement des machines par des essais purement électriques sont susceptibles de donner une exactitude plus grande que les méthodes précédentes, surtout quand on emprunte le courant à une batterie d'accumulateurs suffisamment puissante. Ce sont les méthodes actuellement le plus en faveur parmi les électriciens. Toutefois, il faut reconnaître que lorsqu'on désire mesurer les frottements et éprouver la solidité des paliers, rien ne remplace un essai direct avec le moteur *ad hoc*, qui permet de juger du fonctionnement de la machine dans les conditions d'utilisation.

Méthode de MM. Hopkinson. — La méthode suivante permet de réduire les erreurs résultant des essais mécaniques en ne mesurant, à l'aide d'un dynamomètre, que l'énergie absorbée par les pertes intérieures des dynamos. Si celles-ci représentent 10 pour 100 de l'énergie utile et si l'on commet une erreur de 5 pour 100 dans la mesure dynamométrique, on peut encore estimer le rendement des machines à 0,5 pour 100 près.

La méthode repose sur l'hypothèse de l'égalité des rendements de deux dynamos identiques couplées et fonctionnant l'une comme génératrice et l'autre comme moteur, le courant de la première étant envoyé dans la seconde. L'énergie mécanique nécessaire pour entretenir les deux machines en marche normale est alors égale à la somme des pertes intérieures des deux dynamos.

Celles-ci sont manchonnées après que leurs arbres ont été placés dans le prolongement l'un de l'autre. Si l'on n'est pas certain de maintenir l'alignement des deux axes, il faut, pour éviter les frottements exagérés sur les coussinets, se servir d'un accouplement élastique tel qu'un manchon Raffard ou d'un ressort à boudin en acier. Les deux dynamos sont commandées par une courroie, sur laquelle on dispose un dynamomètre de transmission.

Lorsque les deux dynamos sont excitées en dérivation, leur couplage électrique n'offre aucune difficulté et il est aisé de régler les excitations, par des rhéostats de champ magnétique, de manière que l'une des machines développe une force électromotrice plus

grande que celle de l'autre et fasse fonction de générateur ; son courant passe dans la seconde machine qui fait l'office de moteur. On fait en sorte que les deux dynamos soient traversées par le courant normal. Lorsqu'elles sont à excitation en série ou à excitation composée, il est plus simple d'exciter les inducteurs par une source indépendante, de manière à éviter les renversements de pôles qui peuvent résulter de fausses manœuvres.

Pour que la puissance moyenne des deux dynamos représente la puissance normale de ces machines, il faut nécessairement que le générateur fonctionne au delà de la charge normale et le moteur en deçà de cette charge. Le premier des appareils absorbe donc une puissance égale à la puissance normale augmentée de ses pertes intérieures, tandis que le second restitue la même puissance diminuée des pertes intérieures qui lui sont propres. Avec des machines assez fortes pour que les pertes ne représentent que 10 pour 100 de la puissance utile, cette surcharge n'offre pas d'inconvénient et, dans ces conditions, le rendement ne diffère pas sensiblement du rendement sous la charge normale, la courbe du rendement présentant, en général, peu de variations au voisinage de cette charge.

La puissance $2p$, mesurée à l'aide du dynamomètre de transmission, représente les échauffements dus aux effets mécaniques, électriques et magnétiques dans les deux machines. Dans l'hypothèse de l'égalité des rendements de celles-ci, la part qui revient à chacune des machines est p. Par suite, en appelant P la puissance électrique mesurée aux bornes communes, le rendement de la génératrice a pour expression

$$\eta = \frac{P}{P+p}.$$

Cette méthode permet d'essayer des dynamos de grande puissance avec un moteur et un dynamomètre relativement faibles, attendu qu'il n'y a guère à fournir et à mesurer que le cinquième de la puissance d'une des dynamos.

On peut, par ce procédé comme par quelques uns des suivants, estimer la perte dans une transmission par courroie. On commence par coupler directement les dynamos, puis on les réunit par l'intermédiaire d'une courroie : la différence des puissances

mesurées dans les deux cas au dynamomètre indique la perte cherchée. A l'essai dynamométrique, on peut substituer une mesure à l'aide de diagrammes d'indicateur, si le moteur est à vapeur.

Enfin, si l'on dispose d'un moteur électrique dont on connaît le rendement sous diverses charges, le mieux est de s'en servir pour attaquer les deux dynamos par un accouplement direct. Ce système permet de substituer à la mesure mécanique des pertes qu'entraînent celles-ci, la mesure électrique de la puissance absorbée par l'électromoteur. Cette puissance représente les pertes dans ce dernier et dans les deux machines principales.

Méthode de MM. Fontaine et Cardew. — Il est aussi possible, comme l'ont montré séparément M. Fontaine et M. Cardew, de supprimer toute mesure dynamométrique lorsqu'on dispose d'une troisième dynamo ou d'une batterie d'accumulateurs suffisante. Dans ce cas, les deux dynamos identiques à essayer, ayant leurs arbres couplés comme dans la méthode précédente, sont reliées l'une à la source auxiliaire, l'autre à un circuit formé de résistances artificielles. La première machine tournant comme moteur actionne la seconde qui sert de générateur. Le rapport des watts recueillis aux bornes de celui-ci aux watts fournis au moteur est approximativement égal au carré du rendement de chacun des appareils. Si l'on se sert des mêmes instruments pour effectuer les deux séries de mesures électriques, le résultat n'est pas influencé par une erreur d'étalonnage de ces appareils. Il suffit que les indications de ceux-ci soient rigoureusement proportionnelles pour obtenir la valeur exacte du rendement combiné. De plus, une erreur due à ces instruments est atténuée par cette circonstance que le résultat cherché dépend de la racine carrée des lectures.

Comme dans la méthode précédente, il faut faire fonctionner les deux machines sous des régimes de courant aussi voisins que possible, la différence de potentiel appliquée au moteur dépassant la tension normale d'une quantité à peu près égale à l'excès de la tension normale sur la différence de potentiel fournie par la machine génératrice.

Cette méthode permet d'essayer sans difficulté les dynamos quel que soit leur mode d'excitation ; celui-ci peut différer dans les deux

machines. Bien plus, on peut étudier par ce procédé des dynamos construites pour des voltages différents, pourvu que la puissance et la répartition des pertes intérieures soient les mêmes dans les deux appareils.

La méthode a l'inconvénient d'exiger une source de courant auxiliaire capable de développer une puissance supérieure à celle des dynamos essayées. Si l'on utilisait le courant produit par la seconde machine à l'essai pour aider la source auxiliaire, on pourrait réduire l'importance de celle ci à la puissance perdue dans les deux dynamos et déterminer le rendement de machines de grande puissance au moyen d'une dynamo ou d'une batterie d'accumulateurs relativement faible.

Méthode de Lord Rayleigh et de M. Kapp. — C'est ce qu'ont fait Lord Rayleigh et M. Kapp. Désignons par D_1 et D_2 les deux machines à essayer supposées excitées en dérivation. On les accouple mécaniquement en observant les recommandations faites

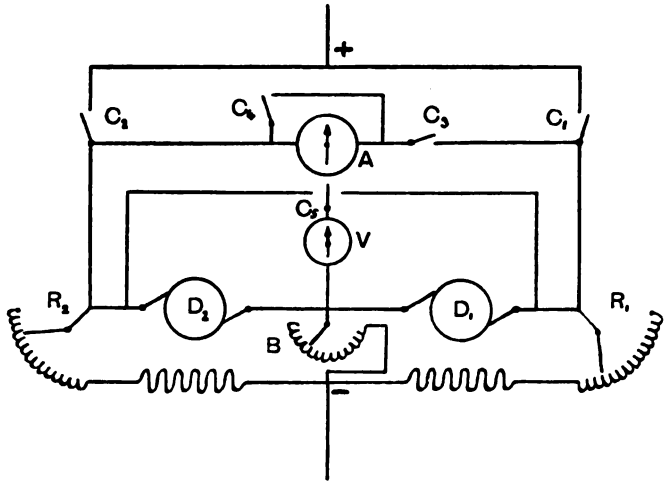


Fig. 191.

à propos de la méthode de MM. Hopkinson et l'on dispose leurs circuits électriques comme l'indique la fig. 191, dans laquelle R_1 et R_2 désignent les rhéostats de champ magnétique, B un rhéostat de démarrage, C_1, C_2, C_3, C_4 et C_5 des clefs de circuit,

A un ampèremètre et V un voltmètre. Soit D_1 la dynamo choisie comme moteur, le choix étant indifférent, puisque tout est symétrique. On ferme la clef C_1 et l'on met D_1 en marche à vide, à l'aide du rhéostat de démarrage. On règle la vitesse du moteur au moyen du rhéostat R_1. On excite ensuite la dynamo D_2 et l'on règle le rhéostat R_2, jusqu'à ce que D_2 donne exactement la même différence de potentiel que D_1, ce qu'on vérifie à l'aide du voltmètre V.

Lorsque ce résultat est atteint, on n'observe qu'un courant minime dans l'ampèremètre au moment où l'on ferme la clef C_3, qui couple les dynamos en parallèle. Suivant qu'on ferme la clef C_1 ou la clef C_2, l'ampèremètre indique le courant débité par le générateur ou le courant absorbé par le moteur. La différence mesure le supplément de courant emprunté à la source auxiliaire. L'emploi d'un même ampèremètre et d'un même voltmètre pour les deux machines réduit au minimum les erreurs qu'entraînent les mesures. La clef C_4 sert à mettre l'ampèremètre en court-circuit, s'il est susceptible de s'échauffer d'une manière anormale par le passage continu du courant.

On augmente graduellement l'excitation de D_2 jusqu'à ce que le courant I_2, débité par cette machine, soit en deçà de l'intensité du courant de régime d'une quantité égale à l'excédent, sur celui-ci, du courant I_1 absorbé par le moteur.

On lit à diverses reprises les courants I_1 et I_2, en manœuvrant alternativement les clefs C_1 et C_2. On mesure simultanément les voltages V_1 et V_2 en déplaçant le commutateur C_5 ; ces voltages diffèrent légèrement à cause de la résistance des fils de connexion, de la clef C_3 et de l'ampèremètre.

Le rapport $\frac{V_2 I_2}{V_1 I_1}$ est sensiblement égal au carré du rendement industriel de chaque dynamo.

Si les voltages sont très peu différents, on a simplement

$$\eta = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}.$$

La disposition décrite ne s'applique bien qu'aux dynamos excitées en dérivation. Avec les dynamos à excitation en série ou composée, la mise en parallèle peut occasionner des renverse-

ments de pôles et des courants excessifs. Déjà dans le cas des dynamos en dérivation, il faut être très circonspect pour ne pas faire de fausses manœuvres.

On préfère souvent laisser les circuits d'excitation en dehors des connexions principales et traiter les dynamos comme des machines à excitation indépendante, quel que soit le mode d'enroulement des inducteurs. Il est toujours possible d'estimer la dépense par effet Joule dans ceux-ci, en mesurant leur résistance à chaud ainsi que l'intensité du courant qui les traverse ou la différence de potentiel qui leur est appliquée. Ce procédé a même l'avantage, avec les machines en dérivation, de ne pas faire entrer en ligne de compte, comme cela a lieu dans la disposition précédente, la dépense d'énergie dans les rhéostats d'excitation.

Si i_1 et i_2 désignent les courants dans les induits et si, d'autre part, on a mesuré les pertes par effet Joule W_1 et W_2 dans les inducteurs des machines, on a pour l'expression du rendement

$$\eta = \sqrt{\frac{V_2 i_2 - W_2}{V_1 i_1 + W_1}}. \qquad (1)$$

De l'essai précédent, on peut déduire les pertes par hystérésis, H, par courants de Foucault, C, et par frottements, F, dans chaque dynamo. En supposant la répartition égale entre les deux machines et en appelant R_a la résistance des induits à chaud,

$$H + C + F = \frac{1}{2}(V_1 i_1 - V_2 i_2) - \frac{1}{2} R_a (i_1^2 + i_2^2).$$

La méthode précédente peut encore être appliquée à des machines ayant des excitations identiques et couplées en parallèle, à la condition d'introduire dans le circuit de l'induit de l'une d'elles quelques éléments secondaires en opposition pour réduire la force électromotrice. Ce procédé convient aux machines à inducteur unique et à deux induits, telles que certaines dynamos actionnées par les turbines de Laval.

Dans les combinaisons indiquées ci-dessus, la source auxiliaire doit fournir la même différence de potentiel que les dynamos essayées. Si celles-ci sont construites pour produire un voltage

très élevé, on peut, au lieu de les relier en parallèle par rapport à la source auxiliaire, les mettre en série avec cette dernière, en ayant soin d'exciter séparément les inducteurs, pour éviter tout accident, et en opposant les forces électromotrices des armatures. La source auxiliaire doit alors débiter un courant égal à celui qui circule dans les induits des deux machines et suppléer à la différence entre la tension V_2 fournie par la génératrice et celle V_1 nécessaire à l'électromoteur.

Le rendement est alors

$$\eta = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}}.$$

Méthode de M. Swinburne. — M. Swinburne a suggéré une méthode d'essai très rapide, dont on peut déduire le rendement d'une dynamo sous diverses charges, et qui n'exige qu'une source d'électricité auxiliaire suffisante pour faire fonctionner la machine à vide.

Le procédé repose sur l'hypothèse de la constance des pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault d'un moteur électrique à vide et en charge, pour un flux magnétique donné à travers l'induit, et sur l'égalité des rendements d'une dynamo fonctionnant comme moteur et comme générateur.

Considérons, par exemple, une génératrice en série donnant, à la vitesse normale de N tours par seconde, une différence de potentiel aux bornes v et un courant i. Le rendement de la machine a pour expression

$$\eta = \frac{vi}{vi + r_1 i + r_2 i^2 + a},$$

r_1, r_2 et a représentant respectivement la résistance de l'induit, celle des inducteurs et les pertes par frottements, par courants de Foucault et par hystérésis.

$$x = F + C - H.$$

La force électromotrice totale que la dynamo développe en marche normale est

$$e = v + r_1 i + r_2 i.$$

Pour déterminer a, on envoie, dans les inducteurs, un courant indépendant, d'intensité telle que la dynamo, tournant comme moteur à vide à la vitesse N, produise la même force électromotrice e. Soit i' le courant très faible qui passe dans l'induit. La différence de potentiel aux bornes est

$$v' = e + i' r_a ;$$

le second terme est généralement négligeable devant le premier.

Le flux total à travers l'induit est alors le même que lorsque la machine fonctionne en charge, car on a

$$\mathfrak{N} = \frac{e \times 10^8}{n\mathrm{N}},$$

n étant le nombre de fils à la périphérie de l'induit. Dans ces conditions, les pertes par hystérésis à vide sont les mêmes qu'en charge ; les pertes par frottements sont également peu différentes, les frottements variant dans de très faibles proportions avec la charge. Les pertes par courants de Foucault seules sont sensiblement plus élevées en charge qu'à vide, par suite de la déformation du champ qui, en charge, rend les variations de flux magnétique plus brusques ; en outre, dans les machines à anneau, le courant circulant dans les parties intérieures des spires de l'induit développe un champ dans le vide de l'anneau, ce qui produit en charge des courants de Foucault dans les supports de l'armature et dans l'arbre mobile. Néanmoins, pour une première approximation, on peut admettre que les pertes à vide sont égales à celles en charge et qu'elles sont mesurées par

$$i' e = a.$$

On a donc pour la valeur approchée du rendement

$$\eta = \frac{vi}{vi + (r_a + r_s) i^2 + ei'}. \qquad (2)$$

Dans le cas d'une machine en dérivation, dont l'inducteur de résistance r_d est traversé en charge par un courant i_d, on aurait

$$\eta = \frac{vi}{vi + r_a (i + i_d)^2 + r_d i_d^2 + ei'} \qquad (2').$$

On remarquera que cette méthode est analogue à celle qui consiste à déterminer le rendement d'une machine à vapeur par la mesure de la puissance indiquée lorsque la machine marche à vide.

S'il s'agit d'un électromoteur et non d'une dynamo génératrice, on doit prendre pour v la tension normale appliquée aux bornes de la machine, pour i le courant total absorbé, et l'on a alors pour le rendement d'un moteur en dérivation, par exemple,

$$\eta = \frac{vi - r_a (i - i_d)^2 - r_d i^2_d - ei'}{vi} \quad (3).$$

La méthode de M. Swinburne permet d'estimer le rendement non seulement à pleine charge, mais à toutes charges.

Les appareils de mesure exigés pour l'exécution de cette méthode se réduisent à un voltmètre, un ampèremètre et un compte-tours pour relever la vitesse. Dans le cas d'une excitation en dérivation, on mesure la résistance des inducteurs à chaud au moyen du voltmètre et de l'ampèremètre.

Il convient, pour obtenir des résultats précis, de faire usage d'une batterie d'accumulateurs comme source auxiliaire, afin de maintenir le courant d'essai bien constant, à moins qu'on ne dispose d'une dynamo génératrice conduite par un moteur absolument régulier, et encore, dans ce dernier cas, une certaine circonspection est-elle nécessaire. On évitera, par exemple, d'essayer un moteur en dérivation puissant à l'aide d'une petite génératrice en série, car les variations de vitesse amenées par les réactions d'inertie du moteur électrique sont susceptibles d'occasionner un renversement de sens du courant dans la génératrice.

A part l'erreur due à la variabilité des pertes, la méthode précédente est très précise parce que la mesure porte uniquement sur la puissance perdue dans la dynamo, c'est à dire sur la différence entre la puissance absorbée et la puissance utile. Si la différence représente 10 pour 100 de cette dernière, par exemple, et peut être estimée à 2 pour 100 près, à l'aide du voltmètre et de l'ampèremètre, le rendement trouvé est exact à 0,2 pour 100.

Un léger écart dans la vitesse N du moteur marchant à vide a très peu d'influence sur le courant i' mesuré, attendu que

$$i = \frac{v - e}{r_a}.$$

et que la force contre-électromotrice e varie sensiblement comme v' avec la vitesse ; une variation de vitesse de 4 à 5 pour 100 n'apporte pas de modification sensible dans la valeur de i'.

Lorsque les valeurs v, i et N sont indiquées par le constructeur, il est bon de vérifier si la machine est capable de fonctionner dans ces conditions, sans échauffements excessifs.

Il résulte de la comparaison entre les résultats fournis par la méthode de Lord Rayleigh et de M. Kapp et ceux obtenus par la méthode de M. Swinburne que la première conduit à un rendement un peu trop faible, parce que les deux dynamos employées fonctionnent l'une au dessus, l'autre en dessous de la puissance normale, l'écart étant d'autant plus grand que le rendement est moindre, tandis que la seconde méthode amène un résultat trop fort, attendu que les pertes a croissent avec la charge. Dans le cas de machines puissantes, ayant un grand rendement, si l'on veut obtenir une valeur plus approchée de celui-ci, on prendra, pour $a = H + C + F$, la moyenne entre les résultats fournis par les deux méthodes.

Application des deux méthodes précédentes. — Voici les résultats d'un essai de deux moteurs D_1 et D_2, de construction identique, excités en dérivation et devant développer une puissance voisine de 10 chevaux, au régime de 114 volts, 75 ampères et 900 tours par minute.

Les appareils de mesure étaient un voltmètre Weston pour lire les tensions et un millivoltmètre, dérivé sur 0,001 ohm, pour déterminer les intensités. Ces deux appareils avaient été étalonnés au préalable. Les calculs numériques ont été effectués à la règle de 0,52 m.

Les machines, couplées par l'intermédiaire d'un ressort à boudin et reliées électriquement, suivant le dispositif de Kapp, mais avec excitation indépendante, ont été maintenues en marche normale pendant deux heures et demie, pour échauffer les circuits. Après cette durée, une série de lectures ont donné les moyennes ci-dessous :

Moteur D_1 : $i_1 = 86{,}2$; $V_1 = 113{,}97$; $I_1 V_1 = 9\,825$ watts.
Moteur D_2 : $i_2 = 66{,}5$; $V_2 = 115{,}98$; $I_2 V_2 = 7\,717$ watts.

Nombre moyen de révolutions : 1121 par seconde.

La température extérieure de l'induit, après 2 1/2 heures de marche forcée, était supérieure de 34° C à la température ambiante.

Il résulte de ces chiffres que

$$H + C + F = \frac{1}{2}(9\,825 - 7\,717) - \frac{1}{2} r_a (\overline{86,2^2} + \overline{66,5^2}).$$

Pour déterminer la résistance intérieure des armatures, r_a, on y a fait passer, au moment de l'arrêt, un courant mesuré au moyen du millivoltmètre et d'une résistance étalon, la différence de potentiel aux balais étant déterminée par un voltmètre Weston marquant de o à 3 volts. La moyenne de 3 déterminations a été 0,061 ohm.

Les inducteurs, mesurés par le même procédé, ont donné 32,95 ohms.

De ce qui précède, on déduit $H + C + F = 692,5$ watts à 1 121 tours par minute, avec un courant moyen dans l'induit de 76,4 ampères et une force électromotrice moyenne de 114,3 volts, égale à

$$\frac{V_1 - I_1 r_a + V_2 + I_2 r_a}{2}.$$

La méthode de M. Swinburne, appliquée ensuite au moteur D_1, a fourni les résultats suivants :

Volts aux bornes, v'.	Courant à vide, i'.	Tours par minute.
114,2	5,3	1116
114,2	5,3	1117
114,2	5,3	1154

Ces chiffres montrent le peu d'influence d'une variation de vitesse à vide.

D'après cela, on voit que l'essai Swinburne donne, dans les conditions de vitesse de l'essai Kapp,

$$H + C + F = 606 \text{ watts},$$

l'effet Joule dû au courant de 5,3 ampères pouvant être négligé.

On voit donc que le rapport des pertes trouvées par les deux méthodes est

$$\frac{[H + C + F]_{\text{Kapp}}}{[H + C + F]_{\text{Swinburne}}} = \frac{692,5}{606} = 1,142.$$

Connaissant ce rapport, il suffit d'essayer les moteurs du même type par la méthode de Swinburne dans les conditions indiquées par le constructeur. Le moteur D_1, par exemple, a été construit pour absorber 114 volts et 75 ampères à 900 tours par minute. Le courant dans l'induit est alors $75 - \frac{114}{32,9} = 71,53$ ampères et la perte en volts dans l'induit atteint 4,36. La force contre-électromotrice est donc 109,64 volts. D'autre part, les résultats de l'essai Swinburne, effectué dans les conditions normales, ont été $v' = 109$; $i' = 4,89$; $N = 895$ tours par minute.

Dans ces conditions, on a donc

Puissance normale absorbée	8 550 watts.
Effet Joule dans l'armature	311 id.
Id id id l'inducteur	395 id.
H + C + F	537 id.
Pertes totales	1 243 id.
Rendement Swinburne $\frac{8550 - 1243}{8550}$, soit	0,855
Rendement Kapp, déduit du précédent en majorant les pertes H + C + F dans le rapport de 1 à 1,142	0,848
Rendement moyen	0,8515

Discussion de la méthode de M. Swinburne. — La formule du rendement industriel d'un électromoteur en dérivation est

$$\eta = \frac{Vi - i_a^2 r_a - i_d^2 r_d - V' i'}{Vi};$$

V et i définissent les conditions de fonctionnement normal de la machine. On détermine expérimentalement r_a et r_d qui servent à calculer i_a et i_d; soient dr_a et dr_d les erreurs que comportent ces mesures.

Pour que $V' i'$ représente bien les pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault en marche normale, il faut rétablir la même vitesse et la même force électromotrice. Supposons qu'au lieu de réaliser la vitesse N, on opère à $N + dN$ tours et qu'au lieu de la différence de potentiel V' nécessaire pour avoir la même force électromotrice, on ait aux bornes de la dynamo, dans l'essai Swinburne, $V' + dV'$; dN et dV' comprenant les erreurs de lecture. Soit d'autre part di' l'erreur commise dans la lecture du

courant. Enfin, supposons que, dans des limites restreintes, le produit $V' i'$ soit proportionnel à la vitesse; on a

$$i_d = \frac{V}{r_d},$$

$$i_a = i - i_d = i - \frac{V}{r_d},$$

d'où

$$\eta = \frac{Vi - r_a\left(i - \frac{V}{r_d}\right)^2 - \frac{V^2}{r_d} - V' i''}{Vi}.$$

Les quantités sur lesquelles on peut commettre des erreurs sont r_a, r_d, V', i' et N. Les expressions des erreurs partielles sont les suivantes

$$\frac{d\eta}{dr_a} dr_a = -\frac{\left(i - \frac{V}{r_d}\right)^2}{Vi} dr_a = \left(-\frac{i}{V} + 2\frac{1}{r_d} - \frac{V}{i}\frac{1}{r_d^2}\right) dr_a,$$

$$\frac{d\eta}{dr_d} dr_d = -\frac{2r_a dr_d}{r_d^2} + 2 r_a \frac{V}{i}\frac{dr_d}{r_d^3} + \frac{V}{i}\frac{dr_d}{r_d^3}$$

$$= \left(-2r_a + \frac{2r_a}{r_d}\frac{V}{i} + \frac{V}{i}\right)\frac{dr_d}{r_d^2},$$

$$\frac{d\eta}{di''} di'' = -\frac{V'}{Vi} di',$$

$$\frac{d\eta}{dV'} dV' = -\frac{i''}{Vi} dV',$$

$$\frac{d\eta}{dN} dN = -\frac{1}{Vi}\frac{d}{dN}\left(V' i''\right) dN;$$

comme l'on a admis qu'entre les limites d'expérience les pertes représentées par $V'i'$ sont proportionnelles à la vitesse, cette dernière différentielle est égale à l'expression

$$-\frac{V' i''}{Vi}\frac{dN}{N}.$$

Application : $V = 114$ volts,
$i = 75$ ampères,
$N = 900$ tours par minute,
$r_a = 0{,}061$ ohm,
$r_d = 32{,}95$ ohms,
$V' = 109$ volts,
$i'' = 4{,}89$ ampères.

$$\frac{d\eta}{dr_a}\,dr_a = -\,0{,}5987\,dr_a,$$

$$\frac{d\eta}{dr_d}\,dr_d = \quad 0{,}00129\,dr_d,$$

$$\frac{d\eta}{di'}\,di' = -\,0{,}01276\,di',$$

$$\frac{d\eta}{dV'}\,dV' = -\,0{,}0005723\,dV',$$

$$\frac{d\eta}{dN}\,dN = -\,0{,}0624\,\frac{dN}{N}.$$

Supposons qu'on veuille que l'erreur probable E_p sur le résultat soit de 0,005.

$$E_p^2 = e_{r_a}^2 + e_{r_d}^2 + e_{i'}^2 + e_{V'}^2 + e_N^2.$$

Si l'on admet que toutes les erreurs doivent avoir la même importance

$$e = \frac{E_p}{\sqrt{5}} = \frac{0{,}005}{\sqrt{5}}\,\eta;$$

or

$$\eta = 0{,}869,$$

d'où

$$e = 0{,}001734.$$

Si l'on égale $\frac{d\eta}{dr_a}\,dr_a$, $\frac{d\eta}{dr_d}\,dr_d$, $\frac{d\eta}{di'}\,di'$, $\frac{d\eta}{dV'}\,dV'$, $\frac{d\eta}{dN}\,dN$ à cette valeur, on trouve

$$\frac{dr_a}{r_a} = 0{,}0475,$$

$$\frac{dr_d}{r_d} = 0{,}0408,$$

$$\frac{di'}{i'} = 0{,}0278,$$

$$\frac{dV'}{V'} = 0{,}0278,$$

$$\frac{dN}{N} = 0{,}0278.$$

On constate par ce qui précède qu'il n'est pas nécessaire de mesurer les résistances de la dynamo exactement à la température

de régime. Les erreurs permises, de 4 et 4,7 pour 100, autorisent un écart de température de plus de 10° C, le coefficient de variation du cuivre étant 0,004. Dans ce cas, comme dans beaucoup de cas analogues, l'erreur la plus forte est une erreur systématique provenant de ce qu'on admet dans la méthode que les pertes dans le fer et les pertes par courants de Foucault dans le cuivre de la machine sont les mêmes à vide et à pleine charge.

Méthode de M. Mordey pour séparer les pertes par courants de Foucault et par hystérésis dans l'induit. — Il est très utile de déterminer séparément les pertes par courants de Foucault et par hystérésis qui amènent l'échauffement du noyau en fer d'un induit.

L'effet des courants de Foucault est sensiblement proportionnel au carré de la vitesse, car il est proportionnel au carré de la force électromotrice d'induction qui leur donne naissance et inversement proportionnel à la résistance, laquelle ne varie pas beaucoup si l'échauffement de l'induit n'est pas exagéré; l'intensité de ces courants diminue avec l'épaisseur du fil ou des tôles qui constituent le noyau et peut, par suite, être réduite autant qu'on le veut. Mais le prix de la matière et le coût de la main-d'œuvre de construction varient en sens inverse; il y a donc un juste milieu à garder. On ne descend pas en dessous de 0,5 mm d'épaisseur pour les tôles des armatures des machines à courants continus et de 0,3 mm pour les noyaux des transformateurs et les induits des machines à courants alternatifs. Les courants de Foucault dans les conducteurs induits sont combattus par l'emploi, dans l'enroulement de l'armature, de faisceaux de fils de cuivre tordus. Pour les supports des armatures à anneau, on emploie des métaux de haute résistibilité pour éviter les courants parasites dus au champ intérieur créé par le courant de l'induit.

L'échauffement par hystérésis est, pour une induction magnétique maxima donnée, proportionnel à la vitesse et indépendant du sectionnement du noyau, pourvu que le volume total du fer de ce dernier reste constant. Les pertes par frottements sont aussi sensiblement proportionnelles à la vitesse.

S'appuyant sur ces considérations, M. Mordey a combiné une méthode industrielle propre à déterminer séparément l'effet de ces

deux catégories de phénomènes. Il commence par mesurer la puissance absorbée par les frottements de la machine tournant à vide, à des vitesses différentes. Il obtient ainsi, à l'aide du dynamomètre de transmission, des valeurs croissant proportionnellement à la vitesse. Il détermine ensuite la puissance absorbée lorsque la dynamo marche à des vitesses croissantes, les inducteurs étant excités séparément de manière à produire le flux normal à travers l'induit et les balais étant enlevés.

Les puissances observées dans ces conditions correspondent aux frottements, aux courants de Foucault et aux effets d'hystérésis. Par différence, on obtient les puissances absorbées, à diverses vitesses, par ces deux dernières causes. Soient P et P′ ces puissances à des vitesses N et N′. L'expression de la puissance dissipée par les courants parasites peut être mise sous la forme $k\,N^2$ et celle correspondant aux effets magnétiques sous la forme $k'\,N$.

On a donc

$$P = k\,N^2 + k'\,N,$$
$$P' = k\,N'^2 + k'\,N',$$

d'où

$$k = \frac{P'\,N - P\,N'}{N'^2\,N - N'\,N^2},$$
$$k' = \frac{P'\,N^2 - P\,N'^2}{N'\,N^2 - N\,N'^2}.$$

Ces deux coefficients mesurent la perte d'énergie par tour due respectivement aux courants de Foucault et au phénomène d'hystérésis.

Les courants parasites qui interviennent dans la méthode exposée sont ceux du noyau en fer, des pièces de consolidation et des conducteurs induits enroulés sur le noyau. Pour estimer séparément l'influence des deux premières causes, on pourrait faire tourner d'abord le noyau seul entre les inducteurs excités. On garnirait ensuite l'induit de ses bobines et l'on renouvellerait l'expérience. Par différence, on connaîtrait la perte due aux courants de Foucault dans l'enroulement.

Méthode de M. Housman. — M. Housman a étudié une méthode propre à conduire au même résultat que le procédé ci-dessus,

mais en évitant l'emploi, toujours peu exact, du dynamomètre. Les inducteurs de la dynamo sont excités séparément de manière à créer le flux magnétique normal à travers l'induit et l'on fait tourner celui-ci, comme moteur à vide, à des vitesses différentes N, N′, N″..., en faisant varier la différence de potentiel appliquée aux balais. En appelant e et i les valeurs de la différence de potentiel et du courant dans l'induit observées dans l'une des expériences faite à la vitesse N, et en remarquant qu'on a sensiblement $e = a\,\mathrm{N}$, a étant un facteur de proportionnalité qu'on peut déterminer en mesurant N, il vient

$$\mathrm{P} = ei = a\,\mathrm{N}\,i = k\,\mathrm{N}^2 + k'\,\mathrm{N},$$

k représentant le coefficient de perte relatif aux courants parasites et k' le coefficient correspondant aux frottements et à l'hystérésis. On déduit de là

$$i = \frac{k\,\mathrm{N}}{a} + \frac{k'}{a} = \frac{k\,e}{a^2} + \frac{k'}{a}.$$

Cette relation montre que l'intensité du courant est une fonction linéaire de la différence de potentiel. Deux expériences suffiraient pour tracer cette droite, mais, pour plus d'exactitude, il est bon de

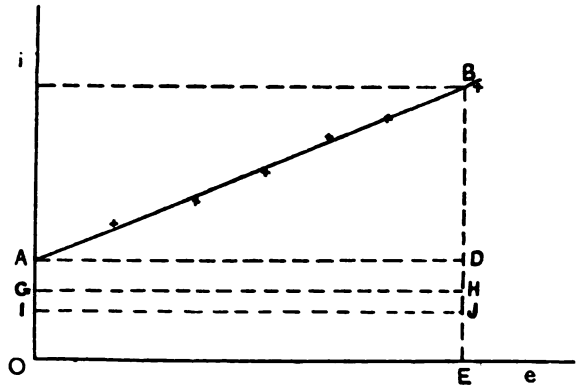


Fig. 192.

relever un grand nombre de points et de marquer la direction moyenne (fig. 192). L'ordonnée à l'origine $\frac{k'}{a}$ mesure le courant

saire pour faire démarrer l'induit.

A la vitesse N pour laquelle $e = \text{OE}$, les pertes $\frac{k'e}{a}$ proportionnelles à la vitesse sont représentées par l'aire ADEO.

Comme tang BAD $= \frac{k}{a^2}$, les pertes par courants de Foucault $\frac{ke^2}{a^2}$ peuvent être représentées par la surface ADBC $= e^2$ tang BAD.

Si l'on veut déterminer les pertes IJEO par frottements contre l'air et contre les coussinets, on actionne à l'aide du moteur étudié une autre machine identique tournant sans excitation et avec les balais relevés. Le supplément de puissance nécessaire à la première dynamo donne la mesure des pertes susdites. Pour connaître les pertes occasionnées par les frottements des balais, on n'a qu'à déterminer la puissance électrique GHJI absorbée en plus quand les balais de la seconde machine sont abaissés. Les frottements des balais ne sont nullement négligeables ; dans les petites machines, ils acquièrent parfois une grande importance ; dans les grandes dynamos multipolaires à balais multiples et à collecteurs de grand diamètre, il est bon de vérifier également si les frottements des balais n'absorbent pas une puissance exagérée.

Chapitre XXXIV.

ALTERNATEURS ET ALTERNOMOTEURS.

Courbes de force électromotrice d'un alternateur. Procédés de M. Joubert, de M. Blondel et de l'auteur. — Les observations faites au sujet des mesures à exécuter avant et pendant la construction des dynamos à courant continu subsistent pour les alternateurs. A ces mesures s'ajoute, à l'occasion de l'étude d'un nouveau type de machine, le tracé de la courbe de la force électromotrice.

1. Un moyen, permettant de calculer la force électromotrice à circuit ouvert, consiste à déterminer, par l'un des procédés décrits précédemment, la distribution du champ magnétique dans lequel se meut l'armature et à déduire de là, en appliquant la loi générale de l'induction, la courbe qui représente en fonction du temps la force électromotrice d'un circuit se déplaçant dans ce champ avec une vitesse angulaire uniforme. Cette méthode n'est d'une application commode que dans le cas d'un induit à disque sans fer ou d'un induit à noyau uni, car si le noyau est pourvu d'une denture, la distribution des lignes de force varie avec la position de l'armature et il convient de déterminer cette distribution pour un grand nombre de positions successives.

On conçoit qu'en modifiant la forme des pièces polaires d'un alternateur on puisse, dans une certaine mesure, changer le taux de variation du flux qui traverse les bobines induites en mouvement et, par suite, modifier la forme de la courbe figurant la force électromotrice. Les ondes de cette courbe présentent des crêtes aplaties ou élancées suivant que les pièces polaires couvrent une surface plus ou moins grande de l'armature.

2. Un autre procédé, dû à M. Joubert, permet de trouver expérimentalement les points successifs de la courbe qui représente les variations de la force électromotrice en fonction du temps. Pour obtenir le point correspondant à une position déterminée de l'induit, un condensateur est disposé de manière à être relié à ce dernier à l'instant considéré. Dans ce but, l'une des extrémités du circuit mobile communique avec l'une des armatures du condensateur par l'intermédiaire d'une bague fixée sur l'arbre et d'un ressort frotteur. L'autre extrémité du circuit est attachée à une lame de cuivre étroite, incrustée dans une bague isolante, et disposée sur l'axe de rotation parallèlement à celui-ci. Un second ressort, relié à l'armature libre du condensateur et passant sur cette bague, touche un instant la lame à chaque révolution de l'armature. Si l'on fixe le ressort à un levier qu'on peut déplacer autour de l'axe de rotation et dont les positions sont repérées sur un arc de cercle, les contacts successifs avec la lame tournante chargent le condensateur à une différence de potentiel précisément égale à la force électromotrice que développe l'induit dans la position correspondant au calage du levier. On détermine cette différence de potentiel à l'aide d'un galvanomètre balistique ou avec un électromètre. En répétant l'expérience pour une série de positions du levier séparées par des écarts angulaires correspondant à des fractions de la période, on arrive à relever les points de la courbe considérée.

Dans ces expériences, il arrive parfois que les charges électriques statiques, développées par le frottement de la courroie sur la poulie de la machine, donnent au condensateur une charge parasite qui peut fausser les résultats. Il faut avoir soin de relier l'arbre de l'alternateur à la terre pour éviter cette perturbation.

La méthode de M. Joubert peut être employée pour déterminer

non seulement la force électromotrice d'un alternateur à circuit ouvert, mais aussi la différence de potentiel développée par le générateur aux bornes d'un circuit extérieur ou aux extrémités d'une résistance quelconque intercalée dans ce circuit. On peut constater ainsi que la courbe des différences de potentiel aux bornes d'un alternateur est modifiée lorsqu'on introduit dans le circuit des électro-aimants, dont l'aimantation n'est pas proportionnelle à l'intensité du courant.

Le procédé de M. Joubert peut être appliqué, pour trouver les variations d'une différence de potentiel périodique, quand l'alternateur qui engendre celle-ci n'est pas accessible, en se servant d'un petit moteur synchrone pour faire tourner le contact mobile.

3. M. Blondel [1] a perfectionné la méthode de M. Joubert de manière à obtenir par la stroboscopie l'enregistrement photographique de la courbe. La décharge du condensateur, chargé par le contact périodique, est envoyée, à chaque révolution de l'alternateur, dans un galvanomètre Deprez et d'Arsonval, qui accuse ainsi une déviation permanente proportionnelle à la force électromotrice développée à l'instant du contact. Dans le prolongement de l'axe de l'alternateur est disposé un tambour enregistreur solidaire du levier portant le ressort de contact. Ce tambour est recouvert d'une feuille de papier sensibilisé sur laquelle tombe un rayon lumineux réfléchi par le galvanomètre. Quand on déplace le tambour lentement, à la main ou à l'aide d'un mouvement d'horlogerie, les déviations correspondant aux différentes positions du ressort de contact s'inscrivent sur la feuille sensible.

4. Une autre méthode, employée par l'auteur [2], repose sur l'enregistrement direct du courant fourni par la machine. A cet effet, l'alternateur tourne d'un mouvement très lent, entretenu par un moteur électrique agissant par l'intermédiaire d'un mécanisme retardateur. L'induit de l'alternateur est relié à un galvanomètre du genre des appareils Deprez et d'Arsonval, dont le champ est produit par un électro-aimant puissant. Les pièces polaires de

---

[1] *Lumière Electrique*, t. XLI, p. 401, 1891.

[2] *Bull. de l'Académie de Belgique*, 1888.

celui-ci sont constituées par deux plaques de fer parallèles et rapprochées, entre lesquelles oscille une petite bobine galvanométrique très légère portant un miroir. La suspension métallique de cette bobine est réglée de manière que la période d'oscillation du système mobile en circuit ouvert ne dépasse pas la vingtième partie de la période de variation de la force électromotrice étudiée. On a vu, dans l'étude du galvanomètre balistique, que dans ces conditions les élongations ne sont pas sensiblement modifiées par la période d'oscillation propre de l'appareil. Un shunt rend le galvanomètre apériodique. Les oscillations du miroir, qui peuvent être inscrites par le procédé photographique de l'auteur, décrit au chapitre II, fournissent directement la courbe cherchée.

5. M. Blondel (1) a réalisé également un oscillographe qui permet d'enregistrer les courants alternatifs de courte période, à l'aide d'un dispositif qui rappelle le galvanomètre Deprez à palette mobile. Une palette de fer mince *p* portant un miroir est

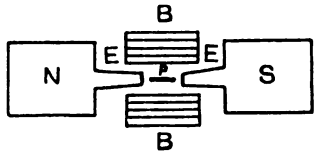


Fig. 193.

fixée, sur pointes, entre les épanouissements polaires E E, en forme de lames, d'un fort électro-aimant N S. Les bobines B B font dévier la palette sous l'action des courants à enregistrer. Grâce à l'intensité du champ directeur, la période de vibration de la palette peut être réduite à $^1/_{1000}$ de seconde.

L'amortissement est obtenu en faisant baigner la partie inférieure de la pièce mobile dans du baume de résine. Cet appareil, transformé en voltmètre, est susceptible d'enregistrer par la photographie la force électromotrice d'un alternateur fonctionnant à circuit ouvert.

---

(1) *Comptes-rendus*, 6 mars et 10 avril, 1893.

Mesure du rendement industriel d'un alternateur. Procédé direct. — La mesure du rendement industriel d'un alternateur, c'est-à-dire la détermination du rapport entre la puissance électrique utile aux bornes de l'induit et la puissance mécanique absorbée par l'arbre de la machine, s'effectue en évaluant cette dernière par l'un des procédés décrits au chapitre II, tandis que la puissance électrique est relevée par l'une des méthodes applicables aux courants alternatifs.

Souvent, les alternateurs développent des forces électromotrices très élevées et l'on est obligé d'employer des wattmètres ou des voltmètres spéciaux, dont les circuits, soumis à la tension totale, présentent une grande résistance réalisée, par exemple, par des lampes à incandescence groupées en série ou des fils minces tendus en zigzag ou enroulés en double pour éviter la self-induction.

Dans l'estimation de la puissance absorbée par un alternateur, il faut évidemment tenir compte de la dépense d'excitation de ce dernier, en affectant éventuellement cette dépense d'un coefficient destiné à tenir compte du rendement de la machine excitatrice.

Pour recueillir les éléments nécessaires au tracé de la courbe du rendement et de la caractéristique extérieure sous diverses charges, il faut repéter les expériences en maintenant invariables la vitesse de l'alternateur et son excitation et en faisant varier la résistance reliée à ses bornes. Si l'on veut construire les courbes de réaction d'induit, on maintient au contraire le courant de l'induit constant, ainsi que la vitesse, et l'on donne au courant d'excitation des intensités variables. En répétant ces essais avec divers regimes du courant dans l'induit, on réunit les données permettant de déterminer la réaction de l'induit correspondant à une excitation et à un courant utile quelconques.

La méthode directe de mesure du rendement nécessite souvent des moteurs très puissants, dont les laboratoires ne disposent que rarement. En outre, elle comporte une cause d'erreur importante due à l'incertitude du rendement organique de la machine motrice. Pour ces raisons, on a cherché, pour l'essai des alternateurs, comme pour celui des dynamos à courant continu,

des méthodes supprimant les mesures mécaniques ou restreignant considérablement la portée des erreurs qu'entraînent celles-ci, tout en permettant l'emploi de moteurs dont la puissance est beaucoup plus faible que celle des alternateurs essayés. Comme ces générateurs comportent en général un grand nombre de bobines constituant autant de machines partielles, on peut, par diverses combinaisons de ces dernières, faire fonctionner une partie de l'alternateur comme moteur et une autre partie comme générateur, de manière à n'avoir à apporter, sous forme d'énergie mécanique ou électrique, que l'équivalent des pertes intérieures de la machine. Comme pour les dynamos à courant continu, l'essai direct est toutefois le seul qui renseigne sur les qualités mécaniques des paliers et sur les frottements que ceux-ci éprouvent sous l'effet des courroies.

Méthodes de M. Mordey. — Le système préconisé par MM. Hopkinson pour les courants continus et qui consiste à compenser, par un moteur, les dépenses intérieures des deux machines, peut s'appliquer ici de diverses manières.

1. On peut utiliser deux alternateurs fonctionnant l'un comme générateur, l'autre comme moteur, le premier envoyant son courant dans le second. L'essai est alors conduit de la même manière que celui des machines à courant continu, l'excitation des deux machines étant réglée de manière à obtenir les forces

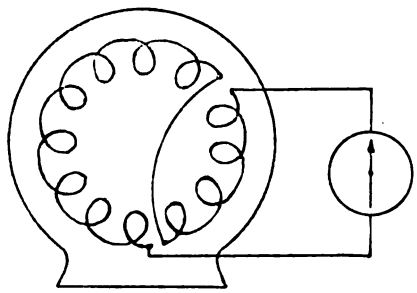


Fig. 194.

électromotrice et contre-électromotrice propres à faire circuler le courant normal dans les induits.

2. Avec les alternateurs multipolaires à induit fixe, on peut appliquer le même procédé à un alternateur unique, en divisant le circuit induit en deux parties de forces électromotrices inégales, qu'on oppose l'une à l'autre, de manière à obtenir le courant normal mesuré par un ampèremètre (fig. 194). L'une des parties de l'alternateur fonctionne alors comme générateur ; l'autre, qui développe la force contre-électromotrice, remplit le rôle de moteur.

Comme dans la méthode de MM. Hopkinson, on mesure, à l'aide d'un dynamomètre ou d'après des diagrammes d'indicateur, la puissance mécanique absorbée par l'arbre de l'alternateur, laquelle représente les pertes intérieures dans l'induit de celui-ci. On peut aussi attaquer l'alternateur par un couplage direct avec un moteur à courant continu dont on connaît le rendement sous diverses charges, de manière à n'avoir à mesurer que la puissance électrique aux bornes de ce dernier moteur.

Méthode de MM. Ayrton et Sumpner. — MM. Ayrton et Sumpner ont proposé une modification à la méthode précédente, permettant de l'appliquer à des alternateurs dont l'induit est mobile, sans être obligé d'utiliser des collecteurs supplémentaires pour effectuer le couplage des deux parties de l'armature. Rien n'est modifié à celle-ci, mais les inducteurs sont divisés en deux groupes égaux, les connexions de l'un d'eux étant interverties, de telle sorte qu'ils produisent, dans les deux moitiés de l'induit qu'ils recouvrent, des forces électromotrices antagonistes. Les courants d'excitation des deux groupes d'inducteurs sont réglés par des rhéostats, de manière à obtenir dans l'enroulement induit le courant normal. L'alternateur est actionné par un moteur à courant continu accouplé directement. L'essai est répété à diverses vitesses. La puissance absorbée par l'électromoteur représente les pertes dans ce dernier, connues par des expériences préalables, ainsi que les pertes par effet Joule, frottements, hystérésis et courants de Foucault dans l'induit de l'alternateur.

MM. Ayrton et Sumpner font remarquer que cette méthode est également applicable à l'essai d'une machine multipolaire à courant continu. Avec un induit enroulé en quantité et dépourvu de connexions intérieures, il suffit d'affaiblir l'excitation d'une moitié

des inducteurs et de mettre l'induit en court-circuit sur un ampèremètre, en réglant les excitations de manière que la force électromotrice d'une partie de l'induit dépasse celle de l'autre partie d'une quantité telle qu'on obtienne le courant normal dans les deux fractions de l'induit fonctionnant en opposition. Si l'induit multipolaire est enroulé en série, il faut, comme avec les alternateurs, intervertir les connexions d'une moitié des inducteurs, pour réaliser l'opposition voulue des forces électromotrices dans le circuit induit.

Ces combinaisons occasionnent, toutefois, des distorsions de flux différentes de celles qu'on observe en marche normale, et qui peuvent modifier les pertes par hystérésis et par courants de Foucault.

Le même reproche s'adresse à la méthode appliquée aux alternateurs.

Autres méthodes de M. Mordey. — 1. On réalise l'équivalent de la méthode préconisée par MM. Fontaine et Cardew pour les machines à courant continu en divisant l'induit d'un alternateur à armature fixe en deux parties égales, dont l'une reçoit le courant d'un alternateur plus faible et fait fonction de moteur, tandis que l'autre partie engendre un courant utilisé dans des résistances artificielles (fig. 195.) La puissance absorbée, d'une part, et la

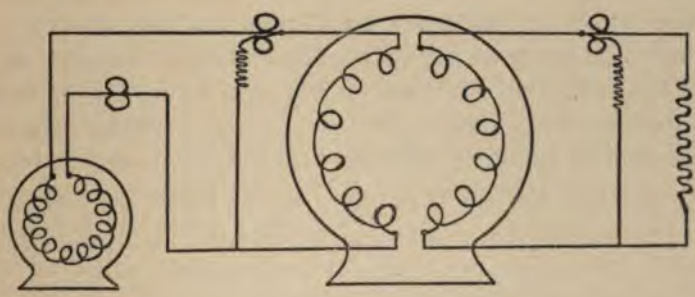


Fig. 195.

puissance développée, d'autre part, sont mesurées au moyen du wattmètre, et leur différence représente les pertes intérieures de l'alternateur.

2. Pour diminuer l'importance de l'alternateur auxiliaire, on peut adopter la combinaison suivante avec un induit fixe. L'induit est divisé en trois parties a, b, c, traversées par le courant d'un petit alternateur de même fréquence (fig. 196). Les parties a et b de l'enroulement sont égales et mises en opposition de manière

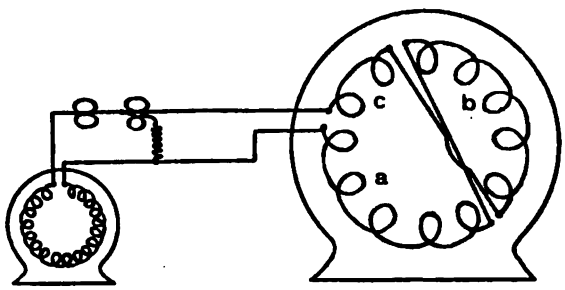


Fig. 196.

à développer des forces électromotrices qui se neutralisent, tandis que les spires c jouent le rôle de moteur synchrone. On règle le courant de façon à atteindre l'intensité normale et l'on mesure les watts fournis par le petit alternateur ; ils représentent les pertes intérieures dans l'induit de l'alternateur essayé.

Méthode de M. Blondel. — M. Blondel reproche aux méthodes précédentes de ne pas tenir un compte suffisant de l'effet des décalages, qui ne sont pas les mêmes dans les conditions de ces essais que dans celles d'un essai direct ; en effet, dans ces méthodes, la machine fonctionne en court-circuit et, comme la réactance de l'alternateur est très supérieure à sa résistance, il s'ensuit que l'angle de phase $\varphi = \text{arc tang } \frac{2\pi\mathcal{L}}{Tr}$ est très voisin de $\frac{\pi}{2}$. Cette circonstance modifie les pertes par hystérésis et par courants de Foucault, les maxima du courant se produisant pour des positions relatives de l'induit et des inducteurs autres que lors du fonctionnement normal. De plus, l'induction mutuelle entre les diverses bobines induites, spécialement avec les armatures à noyau de fer, peut amener des divergences lorsqu'on intervertit les connexions normales de l'alternateur. M. Blondel propose une

autre méthode analogue à celle de M. Swinburne pour les courants continus, et qui, bien que sujette aux critiques précédentes, a l'avantage de n'exiger aucun changement dans les connexions de l'alternateur.

Ce dernier travaille comme moteur à vide sous l'influence du courant fourni par un petit alternateur de même fréquence. On règle l'excitation de la machine essayée de manière que son induit soit traversé par le courant normal, marqué par un ampèremètre intercalé dans le circuit. Cela est possible avec les alternateurs, grâce à leur grande self-induction, le décalage à vide étant voisin de $\frac{\pi}{2}$ et le courant normal correspondant, dans ces conditions, à une puissance absorbée minime. Celle-ci est estimée au moyen d'un wattmètre et représente les pertes intérieures dans l'induit de l'alternateur. M. Blondel cite le cas d'un alternateur accusant par la méthode directe 1 000 watts pour les pertes intérieures dans l'induit, tandis que la méthode ci-dessus ne conduisait qu'à 708 watts, différence qui témoigne de l'effet du décalage.

Chapitre XXXV.

TRANSFORMATEURS.

Objet des essais. — De même que pour les dynamos continues et les alternateurs, il convient d'essayer, avant la construction d'un transformateur, le fer et le cuivre employés. La perte par hystérésis dans le fer a une importance particulière dans cet appareil.

Le transformateur construit, on vérifie l'isolement des circuits. L'isolement laisse parfois à désirer au début, si l'on n'a pas recuit l'appareil à l'étuve pour expulser l'humidité contenue dans le coton qui recouvre les conducteurs. On peut alors, comme on le fait souvent pour les machines dynamo-électriques, obtenir la dessication en faisant passer un courant gradué dans les bobines primaires et secondaires. Il convient d'appliquer au transformateur, pendant l'essai d'isolement, une tension variant du double au quadruple de la tension normale, afin de s'assurer que les isolants ne seront pas percés par les forces électromotrices élevées qui se produisent parfois accidentellement, par exemple lorsque les transformateurs sont introduits dans des circuits possédant une capacité considérable.

L'essai le plus important au point de vue de l'emploi des transformateurs est la mesure du rendement industriel sous diverses

charges, c'est-à-dire du rapport des watts utiles aux watts absorbés. Cette détermination peut se faire par une méthode directe ou par des méthodes indirectes analogues à celle de Lord Rayleigh et de M. Kapp ou à celle de M. Swinburne pour les machines dynamo-électriques.

Au point de vue du constructeur, il est également intéressant de rechercher les pertes par hystérésis et par courants de Foucault, la variation du voltage secondaire lorsque le primaire est soumis à une tension constante, la température de régime et les pertes de flux.

Mesure directe du rendement. — Pour la mesure directe du rendement, on fait fonctionner le transformateur sous sa charge normale et l'on détermine les watts utiles aux bornes secondaires et les watts dépensés aux bornes primaires. Parfois, on ne dispose pas d'un générateur capable de produire la tension primaire requise. On peut alors se servir d'un transformateur auxiliaire pour l'obtention de cette tension. Si la résistance extérieure est constituée par des lampes à incandescence, dont la réactance peut être considérée comme négligeable, il n'y a pas de différence de phase entre la tension et le courant secondaires, et la puissance utile se calcule en faisant le produit de la différence de potentiel efficace par le courant efficace mesurés simultanément à l'aide d'un des voltmètres et d'un des ampèremètres étudiés précédemment à propos de la mesure des courants alternatifs. Le wattmètre peut également être employé si la réactance des circuits de l'appareil est négligeable.

Si l'on ne dispose pas d'un ampèremètre convenable pour la mesure du courant, on intercale à la suite des lampes une petite résistance non inductive en manganine, étalonnée au préalable, et l'on mesure la différence de potentiel aux bornes de cette résistance, ce qui permet de calculer l'intensité du courant.

La détermination de la puissance primaire exige l'emploi d'une des méthodes propres à la mesure de la puissance dans les circuits à réactance.

On peut, par exemple, utiliser la méthode des trois voltmètres préconisée par MM. Ayrton et Sumpner. Cette méthode exige

une haute tension d'essai, qu'on demande, par exemple, à un transformateur auxiliaire en série avec la source ; on a vu, en effet, que le voltage absorbé par la résistance non inductive doit être sensiblement égal à la tension appliquée aux bornes primaires. Cette résistance non inductive est coûteuse à établir dans l'hypothèse où la tension primaire est élevée. On peut la constituer par des séries de lampes à incandescence.

On a vu que l'erreur limite de la méthode des trois voltmètres croît très rapidement quand le cosinus de l'angle de phase diminue. Dans le cas de fonctions plus complexes que la sinusoïde, $\cos\varphi$ doit être remplacé par le facteur de puissance qui est égal au rapport des watts réels aux watts apparents, ceux-ci étant définis par le produit de la tension par le courant. L'erreur peut être très considérable de ce chef, car le facteur de puissance diminue rapidement avec la charge.

Enfin, les lectures multiples qu'entraîne l'emploi de trois voltmètres rendent les expériences très difficiles, lorsqu'on ne dispose pas d'une source d'électricité convenable et, en particulier, lorsqu'on doit faire les essais en se raccordant à une distribution par courants alternatifs.

La méthode de M. Fleming donne lieu à des observations analogues. Par suite des erreurs multiples que cette méthode entraîne, il conviendrait d'employer des ampèremètres pour courants alternatifs beaucoup plus précis que ceux qu'on rencontre dans l'industrie, pour que cette méthode donnât un résultat satisfaisant. Il ne faut pas oublier, en effet, que la différence entre les watts utiles fournis par un bon transformateur et les watts absorbés n'atteint que 4 à 5 pour 100 de ceux-ci, lorsque l'appareil fonctionne en pleine charge, et qu'une erreur de 1 pour 100 dans la mesure des watts dépensés amène une erreur de 20 à 25 pour 100 dans l'estimation des pertes intérieures du transformateur.

Les méthodes électrostatiques donnent également lieu à des erreurs assez fortes.

La méthode calorimétrique n'a ni sensibilité ni précision. De plus, elle exige un temps considérable pour l'établissement du régime des températures dans chaque expérience.

La méthode directe la plus satisfaisante est celle du wattmètre.

M. Fleming recommande l'électrodynamomètre employé comme wattmètre avec des lampes à incandescence en série introduites dans le circuit de la bobine mobile, dérivé sur les bornes du transformateur. Le courant, dans ce circuit, peut être plus élevé que dans la bobine fixe, ce qui ne présente pas d'inconvénient dans des essais dont la durée est assez faible pour que la consommation d'énergie soit sans importance. On évitera de faire usage de wattmètres à enveloppes métalliques, dans lesquelles se développent des courants de Foucault susceptibles de fausser les résultats.

Le même wattmètre peut être employé pour la mesure des puissances primaire et secondaire, afin de rendre minima l'influence des erreurs d'étalonnage dans l'estimation du rendement.

Détermination indirecte du rendement par la puissance consommée à vide. — Comme on l'a vu précédemment, la détermination du rendement d'un transformateur, basée sur la mesure directe des puissances recueillie et absorbée, peut conduire à des erreurs importantes lorsqu'on n'emploie pas des méthodes très précises pour apprécier ces puissances, eu égard à la faible différence que celles-ci présentent. Il est beaucoup plus exact de mesurer la puissance p perdue dans le transformateur par effet Joule, courants de Foucault et hystérésis, ainsi que la puissance utile P. Le rendement est alors

$$\eta = \frac{P}{P + p}.$$

On tire de là

$$\frac{d\eta}{\eta} = \frac{dp}{P + p}.$$

Si p est estimé à 1 pour 100 près et équivaut environ à $^1/_{20}$ de P, l'erreur sur η n'atteint que 0,048 pour 100. Si l'on ne recherche la valeur du rendement qu'à 1 pour 100 près, il suffit, dans l'hypothèse ci-dessus, de mesurer p à 21 pour 100 près.

M. Fleming a déduit de nombreuses expériences qu'à voltage primaire constant les pertes par hystérésis et par courants de Foucault restent sensiblement les mêmes à toutes charges, dans les bons modèles de transformateurs à circuit magnétique fermé. Il suffit donc d'estimer la puissance absorbée par un transformateur

semblable lorsque le circuit secondaire est ouvert et dans les conditions normales de tension primaire : on obtient ainsi les pertes dans le noyau du transformateur augmentées des pertes par effet Joule dans le circuit primaire. Celles-ci sont d'ailleurs très faibles à vide et peuvent s'estimer séparément, si l'on mesure le courant primaire.

Pour connaître les pertes totales dans le transformateur à pleine charge, il n'y a qu'à ajouter aux pertes dans le noyau les dépenses par effet Joule dans les circuits primaire et secondaire traversés par les courants normaux. Si l'on ne dispose pas d'une tension d'essai élevée, on peut intervertir les circuits et appliquer le courant magnétisant à l'enroulement à gros fil en laissant ouvert le circuit à fil fin.

On voit que cette méthode est analogue à celle de M. Swinburne pour l'essai des dynamos à courant continu.

On peut déterminer approximativement les pertes par effet Joule à l'aide du wattmètre de la manière suivante. On met la bobine à gros fil du transformateur en court-circuit sur un ampèremètre et l'on diminue la tension appliquée au circuit à fil fin jusqu'à ce que le courant lu à l'ampèremètre ait atteint l'intensité normale que doit débiter le circuit secondaire. En vertu des propriétés des transformateurs, le courant dans la bobine primaire acquiert alors également l'intensité normale et la dépense dans le noyau devient négligeable. La mesure, à l'aide du wattmètre, de la puissance fournie à la bobine à fil fin fait donc connaître approximativement la dépense par effet Joule dans les deux circuits en pleine charge. En ajoutant ces pertes à celle trouvée en mesurant la puissance absorbée quand on applique la tension normale à l'un des circuits, l'autre circuit étant ouvert, on obtient les pertes totales du transformateur.

Méthode de M. Sumpner. — Un artifice analogue à celui que nous avons déjà rencontré dans l'étude des machines dynamo-électriques permet de déterminer avec une grande précision les pertes à pleine charge dans un type de transformateur dont on possède deux spécimens identiques, cas fréquent chez les constructeurs. L'artifice consiste à mettre en opposition les bobines à fil fin des deux appareils, employées comme circuits secondaires et

à affaiblir légèrement la force électromotrice dans l'une des bobines, de manière à obtenir une force électromotrice résultante capable d'entretenir le courant normal. La puissance absorbée par les circuits à gros fil, mis en dérivation, représente alors les pertes totales dans les deux appareils.

Diverses combinaisons sont susceptibles de donner le résultat voulu. Le schéma représente les deux bobines à fil fin des transformateurs A et B, mises en opposition par deux clefs C_1 et C_2. Les bobines à gros fil sont en dérivation par rapport au circuit

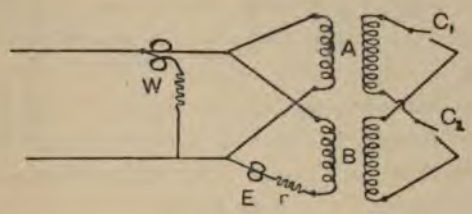


Fig. 197.

d'alimentation et l'on intercale à la suite de l'une des bobines un conducteur r sans réactance. On règle celui-ci jusqu'à ce qu'un électrodynamomètre E indique le courant normal. On a alors également le courant normal dans les bobines à fil fin. Un wattmètre W mesure le total des pertes dans le circuit des deux appareils alimentés. Si l'on déduit de la puissance indiquée par le wattmètre les pertes par effet Joule dans la résistance r et dans les fils de connexion, il reste la puissance dissipée dans les deux transformateurs. La moitié de cette quantité représente les pertes p dans l'un des tranformateurs. La puissance transformée par chacun de ceux-ci peut être mesurée en intercalant la bobine à gros fil du wattmètre en série avec les enroulements à gros fil.

Dans le dispositif de la fig. 198, la différence entre les forces électromotrices d'induction est obtenue par l'emploi d'un petit transformateur auxiliaire T dont le rapport de transformation est l'unité. Le primaire de cet appareil est dérivé sur les conducteurs d'alimentation avec une résistance R et la clef C_3. Le secondaire est en série avec la bobine à gros fil de A. Si celle-ci est construite

pour une tension de 100 volts, on fait en sorte que T donne 5 à 6 volts, qui, en s'ajoutant à la différence de potentiel appliquée à A ou en s'en retranchant, créent dans les circuits à fil fin de A et de B une force électromotrice résultante capable d'entretenir le courant induit normal, lorsque les clefs C_1 et C_2 sont abaissées. L'électrodynamomètre E permet de mesurer le

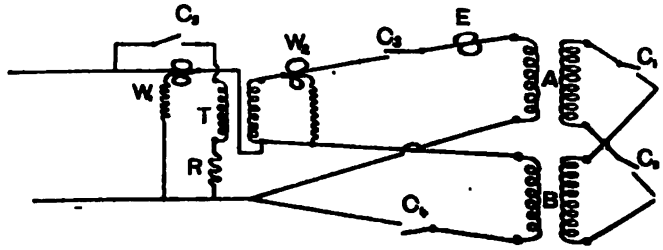


Fig. 198.

courant primaire, qu'on règle par la résistance R. Si l'on abaisse les clefs C_3 et C_4 sans abaisser C_1, C_2 et C_3, le transformateur T est inactif, les circuits à gros fil de A et de B sont soumis à des différences de potentiel sensiblement égales et la dépense d'énergie accusée par le wattmètre W_1 représente les pertes à vide dans les transformateurs.

Si l'on abaisse toutes les clefs et si l'on règle convenablement les courants, les deux transformateurs fonctionnent en pleine charge avec les enroulements à fil fin en opposition. Le total des puissances absorbées par le système est représenté par les indications des wattmètres W_1 et W_2. En soustrayant de la somme de ces indications les pertes dans les fils de connexion, dans l'électrodynamomètre E, dans la bobine à gros fil de W_2 et dans le secondaire de T, on obtient les pertes totales dans les deux transformateurs. p étant la moitié de ces pertes et P la puissance moyenne transformée par A et B, on a

$$\eta = \frac{P}{P + p}.$$

On pourrait introduire un électrodynamomètre dans le circuit de la bobine à gros fil de B, mais la différence entre les courants des deux enroulements à gros fil est si faible qu'elle n'apporte pas d'erreur sensible dans la valeur du rendement ; en effet, avec un rendement voisin de l'unité, il faut commettre une erreur grossière sur p pour qu'il en résulte une différence appréciable sur η.

Facteur de puissance des transformateurs. — Dans l'emploi des transformateurs, il est important de déterminer non seulement les pertes à vide qui constituent une dépense inutile pendant les heures de fonctionnement à circuit ouvert, mais aussi le facteur de puissance ou rapport des watts réels aux watts apparents, définis par le produit des volts par les ampères. Plus le facteur de puissance est faible, plus l'intensité du courant est considérable pour une puissance donnée à transformer et plus est grande la perte par effet Joule dans les câbles d'alimentation venant des machines génératrices.

Dans les bons transformateurs à circuit magnétique fermé, le facteur de puissance est déjà égal à 0,8 pour le dixième de la charge maxima et il s'approche de l'unité pour cette dernière charge. Avec les transformateurs à circuit magnétique ouvert, on ne dépasse guère 0,8 en pleine charge.

La détermination du facteur de puissance n'exige qu'une mesure au wattmètre faite simultanément avec des mesures au voltmètre et à l'ampèremètre.

Dérivations de flux magnétique dans les transformateurs. — Il est essentiel de réduire autant que possible les dérivations de flux qui se produisent particulièrement en pleine charge, lorsque les actions antagonistes des bobines primaire et secondaire tendent à créer des pôles conséquents dans le circuit magnétique. Les dérivations de flux sont très importantes dans un circuit magnétique de forme rectangulaire, lorsqu'on enroule les bobines primaire et secondaire sur deux côtés opposés du rectangle. On restreint beaucoup ces dérivations en subdivisant les bobines et en disposant les éléments de l'un et de l'autre circuit alternativement sur les noyaux. L'effet de ces dériva-

tions de flux est de réduire la force électromotrice secondaire et, par suite, la différence de potentiel utile. La diminution que celle-ci subit de ce chef peut être supérieure à la chute de potentiel due au passage du courant dans la bobine secondaire.

Un moyen indirect permettant de constater les dérivations de flux consiste à disposer dans le voisinage du transformateur un thermomètre à mercure et un thermomètre à alcool accolés. Les deux appareils accusent des températures différentes par suite de l'échauffement provoqué par les courants de Foucault que le flux perdu induit dans le mercure.

L'importance des dérivations magnétiques peut également s'apprécier en enroulant autour des noyaux donnant lieu à des pertes des bobines d'impédance connue et en déterminant les courants induits dans celles-ci.

Pertes par hystérésis dans les transformateurs. — Divers procédés peuvent être appliqués pour déterminer ces pertes.

Un moyen graphique, employé par MM. Ryan et Merritt, consiste à tracer par points la courbe de la différence de potentiel secondaire à circuit ouvert e_2, en utilisant une méthode analogue à celle de M. Joubert (chap. XXXIV), ainsi que la courbe du courant primaire i_1. Si l'alternateur qui engendre le courant utilisé n'est pas accessible, on peut se servir d'un petit moteur synchrone pour mouvoir le contact mobile employé dans cette méthode. Or, les ordonnées de la courbe e_2 sont proportionnelles aux variations de celles de la courbe qui représente le flux magnétique en fonction du temps. A un instant donné, l'ordonnée de la courbe de la force électromotrice est donc égale au coefficient angulaire de la tangente au point correspondant de la courbe du flux. La phase de celle-ci est, d'ailleurs, en avance d'un quart de période sur la phase de la courbe e_2.

Après avoir déterminé les ordonnées de la courbe du flux et celles de la courbe du courant i_1 qui le fait naître, on peut, en prenant les premières comme ordonnées et les valeurs correspondantes des secondes comme abscisses, tracer une courbe fermée représentant un cycle d'aimantation du noyau et dont l'aire

est proportionnelle à la perte par hystérésis en une période. Dans un bon transformateur à circuit magnétique fermé, cette perte est d'ailleurs constante à toutes charges lorsque le voltage primaire est maintenu invariable.

Connaissant la perte par hystérésis, les pertes par effet Joule dans les deux enroulements et les pertes totales du transformateur mesurées par l'une des méthodes précédemment décrites, on peut calculer par différence les pertes par courants de Foucault.

Un autre moyen de séparer les pertes par hystérésis de celles par courants de Foucault consiste à calculer ces dernières et à les déduire des pertes totales.

On sait que si l'on appelle $\mathfrak{B}$ l'induction magnétique maxima dans le fer, déduite de la force électromotrice secondaire maxima, e l'épaisseur, en mm, des tôles de fer et n la fréquence, la perte par courants de Foucault est, en watts par cm^3,

$$\left(\frac{en\mathfrak{B}}{2{,}5 \times 10^6}\right)^2.$$

On peut encore distinguer les pertes par hystérésis de celles dues aux courants de Foucault en remarquant que les premières sont proportionnelles à la fréquence et les secondes au carré de celle-ci. En déterminant les pertes totales dans le noyau à différentes fréquences et dans les mêmes conditions d'induction magnétique maxima, on peut évaluer l'importance de chacune des deux causes de perte en utilisant des formules semblables à celles de la méthode de M. Housman (chap. XXXIII).

On remarquera que les courants de Foucault induits dans les tôles du noyau d'un transformateur et circulant à peu près parallèlement aux côtés de la section transversale des tôles tendent à désaimanter l'intérieur de celles-ci. Il s'ensuit que, pour obtenir un flux total déterminé, il est nécessaire de majorer l'induction magnétique. Ces effets sont toutefois négligeables quand l'épaisseur des lamelles est inférieure à 0,35 mm.

Si l'on veut déterminer la perte due à l'hystérésis du noyau, dans le cas de forces magnétisantes variant lentement, il suffit d'envoyer dans le circuit secondaire des courants variant par degrés, empruntés à une batterie d'accumulateurs, et d'observer les varia-

tions correspondantes de flux à l'aide d'un galvanomètre balistique relié à quelques spires de fil enroulées sur le noyau. Ce procédé, analogue à celui de M. Rowland (chap. XX), accuse, comme on l'a vu, pour les mêmes limites de courant, une perte par hystérésis plus grande que celle du transformateur en service, par suite de l'inertie magnétique du noyau.

Pendant plusieurs années, la question s'est posée de savoir si les pertes dans le noyau d'un transformateur sont constantes ou variables avec la charge, dans les mêmes conditions de force électromotrice. D'après les expériences les plus précises, la réponse est favorable à la constance des pertes.

Parmi les méthodes d'essai directes, la suivante est due à M. Ewing. On construit deux transformateurs d'expérience A et B, ayant les mêmes dimensions et pourvus de noyaux en fil de fer isolé au coton. Le circuit primaire de A est formé de deux couches de fil enroulées dans le même sens; celui de B comprend deux couches enroulées en sens inverses. Il en est de même pour les enroulements secondaires. On met les primaires en série, ainsi que les secondaires, après avoir eu soin de loger dans les noyaux des deux appareils les soudures d'un couple thermo-électrique, dont le circuit comprend un galvanomètre. Le noyau de A s'échauffe par suite de l'hystérésis et des courants de Foucault qu'on réduit à une valeur négligeable en employant du fil de fer suffisamment fin. Le noyau de B est amené à la même température par un courant envoyé dans le fil de fer qui le compose. Les watts absorbés dans ce fil mesurent la perte dans le fer du noyau voisin.

Une cause d'erreur de cette méthode réside dans les courants de Foucault qui peuvent se former dans la masse du couple thermo-électrique. On pourrait comparer les échauffements par le procédé du bolomètre, basé sur la variation de résistance d'un fil de platine très ténu disposé dans le milieu dont on étudie la température.

D'après les observations de M. Partridge [1], analysées par

---

[1] *The Electrician*, 7 déc. 1894.

M. Mordey (1), des transformateurs ont présenté à la longue en service un accroissement de la perte par hystérésis, atteignant 20 à 25 pour 100. Cet effet paraît s'expliquer par l'échauffement du noyau et peut être produit artificiellement par une élévation prolongée de la température de celui-ci, de même ordre que celle due aux effets électriques et magnétiques.

---

(1) *The Electrician*, 21 déc. 1894.

Renseignements pratiques

UX ET ALLIAGES.	DENSITÉ en gr. par cm³.	TÉNACITÉ en kg. par mm².	CONDUCTIBILITÉ relative au cuivre pur de Matthiessen en pour 100.	RÉSISTIBILITÉ à 0° C. en microhms-cm.	COEFFICIENT *moyen* de température vers 20° C.	Fil de 1 mm de diamètre. S. = 0,7854 mm². Résistance linéaire à 0° C. en ohms par km.	Masse linéaire en kg par km.	OBSERVATIONS.
étalon.	8,9	26,7	100	1,593	0,00388	20,29	6,97	*Matthiessen* (réduit à l'ohm international).
électrolytique Swan .	8,91	»	102,05	1,561	0,00428	20,00	7,00	*Dewar et Fleming* (1893).
électrolytique Gram-	9,05	»	103,6	1,538	0,00445	19,58	7,11	Recuit. *Lagarde* (1893).
(Hopkins et Williams)	7,8	»	17,5	9.065	0.0062	115,4	6,13	*Dewar et Fleming* (1893).
ier.	7,8	100	10,8	15,803	0,00390	201,2	—	Administration des télégraphes. *Lagarde* (1888).
er homogène . . .	7,8	»	12,0	13,273	0,00414	169,0	—	— —
ordinaire	7,8	38	11,4	13,906	0,00426	177,0	—	— —
u manganèse . . .	7,81	160	2,1	75	0,00136	954,8	—	
phosphoreux (haute tibilité)	8,91	44,9	98 à 100	1,6	»	20,37	7,0	Fils Montefiore. *Rousseau* (1887).
phosphoreux (fils té- hiques)	—	48	99	1,6	0,00394	20,37	—	— —
phosphoreux (fils té- iques)	—	82	28	5,6	0,00394	71,3	—	— —
silicieux (A)	—	45	97	1,67	0,00152	21,28	—	*Lazare Weiller* (1892).
— (B)	—	50	85	1,79	—	22,85	—	—
— (F)	—	100	20	7,80	—	153,00	—	
chromé télégraphique	8,92	45	98,5	1,641	»	20,89	7.03	*Mouchet.*
chromé téléphonique.	—	75	34,5	4,710	»	59,93	—	—
chromé, longue portee	—	100 à 110	20	7,800	»	153,00	—	—
à 2 pour 100 d'étain .	»	75	35	4,57	0,00152	57,9	»	Administration des télégraphes. *Lagarde* (1888).
d'aluminium à 10 pour	7,7	»	12,9	12,31	0,00105	156,8	6,05	Métal recuit. *Limb* (1892).
étallique Martin . .	8,3	75 à 80	60	2,67	»	33,9	6,52	*Compagnie française du Bimétal.*
de	8,78	60	4,8	33,0	0,00024	421,7	6,89	*Martino* (1885).
ickel, type 4X . . .	8,4	70 à 90	2	78,3	0,00033	997,0	6,60	Recuit.
hort	8,02	»	5,3	30,0	0,00036	381,9	6,75	Cu (60), Zn (25), Ni (15).
lanc Grammont, écroui	»	»	6,6	24,0	0,0002	305,3	»	*Limb* (1892).
lanc Grammont, recuit	»	»	7	22,7	0,00039	289,2	»	—
itan	9,52	»	3,2	50,0	0	636,6	»	*Basse et Selve* (Altena).
à 30 pour 100 de man-	»	»	1,6	100,6	0,00004	1282,2	»	*K. Feussner et Lindeck* (1891).
, Ni (3), Mn (2) . .	»	»	3,3	47,7	-0,00003	607,3	»	— —
, Ni (25)	»	»	4,7	34,2	0,00019	441,9	»	— —
ı	»	»	3	52,5	0,00041	682,5	»	— —
ne d'Obermaier (A) .	»	»	4,7	33,2	0,00030	435,4	»	— —
— (B) .	»	»	3.5	44,8	0,00033	557,7	»	— —
ine.	8,94	»	3,7	46,7	0,000025	591,1	7,06	W. T. *Glover.*

RÉSISTANCE EN OH

Pour des diamètres de 0,05 à 4,0 mm et des résistiv

Diamètre.	Cuivre.				Bronze.					
mm	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00	6,
0,05	8,14	8,63	9,16	9,67	10,10	12,73	15,3	20,4	25,5	30,
0,10	2,04	2,16	2,29	2,42	2,55	3,18	3,8	5,1	6,4	7,
0,15	0,91	0,96	1,02	1,08	1,13	1,41	1,70	2,26	2,83	3,
0,20	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,80	0,95	1,27	1,59	1,
0,25	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,51	0,61	0,81	1,02	1,
0,30	0,226	0,240	0,255	0,269	0,283	0,354	0,424	0,566	0,707	0,
0,35	0,166	0,177	0,187	0,198	0,208	0,260	0,312	0,416	0,520	0,
0,40	0,127	0,135	0,143	0,151	0,159	0,199	0,239	0,318	0,398	0,
0,45	0,101	0,107	0,113	0,120	0,126	0,157	0,189	0,252	0,314	0,
0,50	0,081	0,087	0,092	0,097	0,102	0,127	0,153	0,204	0,255	0,
0,55	0,067	0,072	0,076	0,080	0,084	0,105	0,126	0,168	0,210	0,
0,60	0,057	0,060	0,064	0,067	0,071	0,088	0,106	0,141	0,177	0,
0,65	0,048	0,051	0,054	0,057	0,060	0,075	0,090	0,120	0,151	0,
0,70	0,042	0,044	0,047	0,049	0,052	0,065	0,078	0,104	0,130	0,
0,75	0,036	0,038	0,041	0,043	0,045	0,057	0,068	0,091	0,113	0,
0,80	0,0318	0,0338	0,0358	0,0378	0,0398	0,0197	0,060	0,080	0,099	0,
0,85	0,0282	0,0299	0,0317	0,0335	0,0352	0,0441	0,053	0,070	0,088	0,
0,90	0,0251	0,0267	0,0283	0,0299	0,0314	0,0393	0,047	0,063	0,079	0,
0,95	0,0226	0,0240	0,0254	0,0268	0,0282	0,0353	0,042	0,056	0,071	0,
1,00	0,0204	0,0216	0,0229	0,0242	0,0255	0,0318	0,038	0,051	0,064	0,
1,1	0,0168	0,0179	0,0190	0,0200	0,0210	0,0263	0,0316	0,0421	0,0526	0,
1,2	0,0141	0,0150	0,0159	0,0168	0,0177	0,0221	0,0265	0,0354	0,0442	0,
1,3	0,0121	0,0128	0,0136	0,0143	0,0151	0,0188	0,0226	0,0301	0,0377	0,
1,4	0,0104	0,0110	0,0117	0,0123	0,0130	0,0162	0,0195	0,0260	0,0325	0,
1,5	0,0091	0,0096	0,0102	0,0108	0,0113	0,0141	0,0170	0,0226	0,0283	0,
1,6	0,0080	0,0085	0,0090	0,0095	0,0099	0,0124	0,0149	0,0199	0,0249	0,
1,7	0,0071	0,0075	0,0079	0,0084	0,0088	0,0110	0,0132	0,0176	0,0220	0,
1,8	0,0063	0,0067	0,0071	0,0075	0,0079	0,0098	0,0118	0,0157	0,0196	0,
1,9	0,0056	0,0060	0,0064	0,0067	0,0071	0,0088	0,0106	0,0141	0,0176	0,
2,0	0,0051	0,0054	0,0057	0,0060	0,0064	0,0080	0,0095	0,0127	0,0159	0,
2,2	0,00421	0,00447	0,00473	0,00500	0,00526	0,0066	0,0079	0,0105	0,0132	0,
2,4	0,00354	0,00376	0,00398	0,00420	0,0044.	0,0055	0,0066	0,0088	0,0111	0,
2,6	0,00301	0,00320	0,00339	0,00358	0,00377	0,0047	0,0057	0,0075	0,0094	0,
2,8	0,00260	0,00274	0,00292	0,00308	0,00325	0,0041	0,0049	0,0065	0,0081	0,
3,0	0,00226	0,00240	0,00255	0,00269	0,00285	0,0035	0,0042	0,0057	0,0071	0,
3,2	0,00199	0,00211	0,00224	0,00236	0,00249	0,00311	0,00373	0,00497	0,0062	0,
3,4	0,00176	0,00187	0,00198	0,00209	0,00220	0,00275	0,00330	0,00441	0,0055	0,
3,6	0,00157	0,00167	0,00177	0,00187	0,00196	0,00246	0,00295	0,00393	0,0049	0,
3,8	0,00141	0,00150	0,00159	0,00168	0,00177	0,00221	0,00265	0,00353	0,0044	0,
4,0	0,00127	0,00135	0,00143	0,00151	0,00159	0,00199	0,00239	0,00318	0,0040	0,

ΓRE DE FIL

) microhms-cm (Grawinkel et Strecker).

latine, fer.			Maillechort.				Nickeline, Rhéotan, Manganine.		Diamètre.
o	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0	mm
	51	76	102	127	153	204	255	306	),05
:	12,7	19,1	25,5	31,8	38	51	64	76	0,10
·	5,7	8,5	11,3	14,1	17,0	22,6	28,3	34	0,15
55	3,18	4,8	6,4	8,0	9,5	12,7	15,9	19,1	0,20
53	2,04	3,06	4,1	5,1	6,1	8,1	10,2	12,2	1,25
3	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	5,66	7,07	8,49	0,30
33	1,04	1,56	2,08	2,60	3,12	4,16	5,20	6,24	0,35
14	0,80	1,19	1,59	1,99	2,39	3,18	3,98	4,77	0,40
10	0,63	0,94	1,26	1,57	1,89	2,52	3,14	3,77	0,45
.1	0,51	0,76	1,02	1,27	1,53	2,04	2,55	3,06	0,50
37	0,421	0,63	0,84	1,05	1,26	1,68	2,10	2,53	0,55
33	0,354	0,53	0,71	0.88	1,06	1,41	1,77	2,12	0,60
41	0,301	0,45	0,60	0,75	0,90	1,21	1,51	1,81	0,65
08	0,260	0,39	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	1,56	0,70
81	0,226	0,34	0,45	0,57	0,68	0,91	1,13	1,36	0,75
59	0,199	0,298	0,398	0,497	0,60	0,80	0,99	1,19	0,80
41	0,176	0,264	0,352	0,441	0,53	0,70	0,88	1,06	0,85
26	0,157	0,236	0,314	0,393	0,47	0,63	0,79	0,94	0,90
13	0,141	0,212	0,282	0,353	0,42	0,56	0,71	0,85	0,95
02	0,127	0,191	0,255	0,318	0,38	0,51	0,64	0,76	1,00
84	0,105	0,158	0,210	0,263	0,316	0,421	0,526	0,63	1,1
71	0,088	0,133	0,177	0,221	0,265	0,354	0,442	0 53	1,2
60	0,075	0,113	0,151	0,188	0,226	0,301	0,377	0,45	1,3
52	0,065	0,097	0,130	0,162	0,195	0,260	0,325	0,39	1,4
45	0,057	0,085	0,113	0,141	0,170	0,226	0,283	0,34	1,5
98	0,0497	0,075	0,099	0,124	0,149	0,199	0,249	0,298	1,6
52	0,0441	0,066	0,088	0,110	0,132	0,176	0,220	0,264	1,7
14	0,0393	0,059	0,079	0,098	0,118	0,157	0,196	0,236	1,8
82	0,0353	0,053	0,071	0,088	0,106	0,141	0,176	0,212	1,9
55	0,0318	0,048	0,064	0,080	0,095	0,127	0,159	0,191	2,0
10	0,0263	0,0395	0,0526	0,066	0,079	0,105	0,132	0,158	2,2
77	0,0221	0,0332	0,0442	0,055	0,066	0,088	0,111	0,133	2,4
51	0,0188	0,0283	0,0377	0,047	0,057	0,075	0,094	0,113	2,6
30	0,0162	0,0244	0,0325	0,041	0,049	0,065	0,081	0,097	2,8
13	0,0141	0,0212	0,0283	0,035	0,042	0,057	0,071	0,085	3,0
00	0,0124	0,0187	0,0249	0,0311	0,0373	0,0497	0,062	0,075	3,2
88	0,0110	0,0165	0,0220	0,0275	0,0330	0,0441	0,055	0,066	3,4
79	0,0098	0,0147	0,0196	0,0246	0,0295	0,0393	0,049	0,059	3,6
71	0,0088	0,0133	0,0177	0,0221	0,0265	0,0353	0,044	0,053	3,8
64	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199	0,0239	0,0318	0,040	0,048	4,0

La résistance d'un fil de cuivre commerciai étant r ohms, **pour une élévation de température de $t°$ C la résistance** devient $r + 0{,}0037\ rt$. La table ci-dessous donne **les produits $0{,}0037\ rt$ (Grawinkel et Strecker).**

r Ohms.	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°
2	0,015	0,030	0,044	0,059	0,074	0,089	0,104	0,118	0,133	0,148	0,163	0,178	0,192	0,207	0,222
4	0,030	0,059	0,089	0,118	0,148	0,178	0,207	0,237	0,266	0,296	0,326	0,355	0,385	0,414	0,444
6	0,044	0,089	0,133	0,178	0,222	0,266	0,311	0,355	0,400	0,444	0,488	0,533	0,577	0,622	0,666
8	0,059	0,118	0,178	0,237	0,296	0,355	0,414	0,474	0,533	0,592	0,651	0,710	0,770	0,829	0,888
10	0,074	0,148	0,222	0,296	0,370	0,444	0,518	0,592	0,666	0,740	0,814	0,888	0,962	1,036	1,110
12	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,53	0,62	0,71	0,80	0,89	0,98	1,07	1,15	1,24	1,33
14	0,10	0,21	0,31	0,41	0,52	0,62	0,73	0,83	0,93	1,04	1,14	1,24	1,35	1,45	1,55
16	0,12	0,24	0,36	0,47	0,59	0,71	0,83	0,95	1,07	1,18	1,30	1,42	1,54	1,66	1,78
18	0,13	0,27	0,40	0,53	0,67	0,80	0,93	1,07	1,20	1,33	1,47	1,60	1,73	1,86	2,00
20	0,15	0,30	0,44	0,59	0,74	0,89	1,04	1,18	1,33	1,48	1,63	1,78	1,92	2,07	2,22
22	0,16	0,33	0,49	0,65	0,81	0,98	1,14	1,30	1,47	1,63	1,79	1,95	2,12	2,28	2,44
24	0,18	0,36	0,53	0,71	0,89	1,07	1,24	1,42	1,60	1,78	1,95	2,13	2,31	2,49	2,66
26	0,19	0,38	0,58	0,77	0,96	1,15	1,35	1,54	1,73	1,92	2,12	2,31	2,50	2,69	2,89
28	0,21	0,41	0,62	0,83	1,04	1,24	1,45	1,66	1,86	2,07	2,28	2,49	2,69	2,90	3,11
30	0,22	0,44	0,07	0,89	1,11	1,33	1,55	1,78	2,00	2,22	2,44	2,66	2,89	3,11	3,33
35	0,26	0,52	0,78	1,04	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	3,4	3,6	3,9
40	0,30	0,59	0,89	1,18	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	4,1	4,4
45	0,33	0,67	1,00	1,33	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0
50	0,37	0,74	1,11	1,48	1,8	2,2	2,6	3,0	3,3	3,7	4,1	4,4	4,8	5,2	5,5
55	0,41	0,81	1,22	1,63	2,0	2,4	2,8	3,3	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3	5,7	6,1
60	0,44	0,89	1,33	1,78	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,4	4,9	5,3	5,8	6,2	6,7
65	0,48	0,97	1,44	1,93	2,4	2,9	3,4	3,9	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8	7,2
70	0,52	1,04	1,55	2,07	2,6	3,1	3,6	4,1	4,7	5,2	5,7	6,2	6,7	7,3	7,8
75	0,55	1,11	1,66	2,22	2,8	3,3	3,9	4,4	5,0	5,5	6,1	6,7	7,2	7,8	8,3
80	0,59	1,18	1,78	2,37	3,0	3,6	4,1	4,7	5,3	5,9	6,5	7,1	7,7	8,3	8,9
85	0,63	1,26	1,89	2,52	3,1	3,8	4,4	5,0	5,7	6,3	6,9	7,5	8,2	8,8	9,4
90	0,67	1,33	2,00	2,66	3,3	4,0	4,7	5,3	6,0	6,7	7,3	8,0	8,7	9,3	1,00
95	0,70	1,41	2,11	2,81	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0	7,7	8,4	9,1	9,8	1,06
100	0,74	1,48	2,22	2,96	3,7	4,4	5,2	5,9	6,7	7,4	8,1	8,9	9,6	10,4	1,11

RÉSISTIBILITÉ en ohms-cm de l'eau acidulée sulfurique *(Fleming-Jenkin)*.

DENSITÉ à 15° C.	QUANTITÉ DE H^2SO^4 en p. 100	TEMPÉRATURE EN DEGRÉS C.							
		0.	4.	8.	12.	16.	20.	24.	28.
1,1	15	1,37	1,17	1,04	0,925	0,845	0,786	0,737	0,709
1,2	27	1,33	1,11	0,926	0,792	0,606	0,567	0,486	0,411
1,25	33	1,31	1,09	0,896	0,743	0,624	0,509	0,434	0,358
1,30	40	1,36	1,13	0,94	0,790	0,622	0,561	0,472	0,394
1,40	50	1,69	1,47	1,30	1,16	1,05	0,964	0,896	0,839
1,50	60	2,74	2,41	2,13	1,89	1,72	1,61	1,52	1,43
1,60	68	4,82	4,16	3,62	3,11	2,75	2,46	2,21	2,02
1,70	77	9,41	7,67	6,25	5,12	4,23	3,57	3,07	2,71

RÉSISTIBILITÉ de solutions aqueuses à 18° C. *(Kohlrausch)*.

RICHESSE de la solution en pour 100.	DENSITÉ.	RÉSISTIBILITÉ en ohms-cm.	RICHESSE de la solution en pour 100.	DENSITÉ.	RÉSISTIBILITÉ en ohms-cm.
Potasse caustique.			*Chlorure de sodium.*		
			5,0	1,03	15,00
			10,0	1,07	7,66
4,2	1,04	6,90	15,0	1,11	6,15
8,4	1,08	3,69	20,0	1,15	5,16
16,8	1,16	2,21	25,0	1,19	4,72
25,2	1,24	1,86	26,4	1,20	4,68
29,4	1,29	1,85			
33,6	1,31	1,88	*Sulfate de zinc.*		
42,0	1,43	2,54			
			5,0	1,05	52,1
			10,0	1,11	31,1
Soude caustique.			15,0	1,17	24,1
			20,0	1,23	21,5
			23,7	1,25	20,87
2,5	1,03	9,26	25,0	1,30	20,9
5,0	1,06	5,12	50,0	1,38	22,6
10,0	1,11	3,22			
15,0	1,17	2,90	*Sulfate de cuivre.*		
20,0	1,23	3,08			
25,0	1,28	3,71	2,5	1,02	92,5
30,0	1,34	4,99	5,0	1,05	53,3
35,0	1,39	6,70	10,5	1,11	31,4
40,0	1,44	8,70	15,0	1,17	23,9
42,0	1,46	9,44	17,5	1,20	21,9

Instruction pour la Règle à Calcul

DE M. MANNHEIM.

Division de la règle et lecture des nombres. — **La règle à calcul se compose d'une règle dans la coulisse de laquelle glisse une réglette.**

Les divisions de la partie supérieure de la règle (c'est à dire les divisions placées au dessus de la réglette) constituent deux échelles identiques et consécutives.

La portion depuis 1 gauche jusqu'à 1 milieu constitue la première échelle (1). Cette portion étant prise pour unité de longueur, on a porté les longueurs 1 — 2, 1 — 3, 1 — 4, etc., proportionnelles aux logarithmes de 2, 3, 4, etc., jusqu'à 10, qui a pour logarithme l'unité.

Les longueurs 1 — 2, 2 — 3, etc., sont elles-mêmes divisées par le même procédé, et donnent, par exemple, entre 2 et 3, les logarithmes des nombres tels que 2,1, 2,2, 2,3, etc. On peut continuer de la même manière; mais on est bientôt arrêté, parce que les traits ainsi obtenus finissent par trop se rapprocher.

On doit imaginer par la pensée l'intervalle compris entre deux traits consécutifs divisé de la même manière que précédemment. On remarquera qu'entre 1,1 et 1,2 1,2 et 1,3... 1,9 et 2 on n'a mis que 5 divisions; chacune d'elles vaut donc deux dixièmes. Dans les calculs avec la règle, on pourra ne jamais s'inquiéter de l'ordre décimal à cause de la propriété des caractéristiques; cette propriété permet au trait gauche de représenter 1, 10, 100, 1 000, 0,1, 0,01, etc., puisqu'on peut supposer à gauche ou à droite de la règle autant d'unités qu'on voudra.

---

(1) Cette expression, 1re échelle, sera employée exclusivement pour cette échelle avec la distinction 1re échelle de la règle, 1re échelle de la réglette.

D'après cela un nombre quelconque peut être lu sur la première échelle. La partie inférieure de la règle contient une seule échelle, double de la première. La réglette contient sur sa face les mêmes échelles que la règle, placées de la même manière.

Multiplication. — On emploie les deux échelles inférieures de la règle et de la réglette.

Amener l'un des traits 1 de la réglette sur l'un des facteurs lu sur la règle; lire le produit sur la règle en face de l'autre facteur lu sur la réglette. Si, en employant le trait 1 gauche, le produit ne peut pas être lu sur la règle, employer le trait 1 droite.

Si l'on a employé le trait 1 droite de la réglette, le produit a autant de chiffres qu'il y en a dans les deux facteurs; si l'on a employé le trait 1 gauche, il a un chiffre de moins.

Division. — Le procédé est inverse de celui de la multiplication; on emploie les mêmes échelles.

Placer le diviseur lu sur la réglette au dessus du dividende lu sur la règle; lire le quotient sur la règle au dessous de l'un des traits 1 de la réglette.

Si l'on a employé le trait 1 droite de la réglette, le nombre de chiffres du quotient est égal à la différence entre le nombre de chiffres du dividende et celui du diviseur; si l'on a employé le trait 1 gauche, il y a un chiffre de plus au quotient.

Proportion. — On emploie les deux échelles supérieures de la règle et de la réglette.

Effectuer d'abord l'opération nécessaire pour trouver le quotient, et, sans en faire la lecture, chercher le produit de ce quotient par le 3me facteur de la proportion.

Formation des carrés et extraction des racines carrées. — Les nombres de l'échelle supérieure de la règle sont les carrés des nombres de l'échelle inférieure.

Pour obtenir un carré ou une racine carrée, il suffit de mettre ces nombres en regard, soit au moyen du curseur, soit au moyen de l'un des traits 1 de la réglette. On devra observer que la valeur du trait 1 gauche de l'échelle supérieure est toujours le carré de celle du 1 gauche de l'échelle inférieure, et, par suite, elle ne peut être que 1, 100, 10 000 ou 0,01, 0,0001, etc.

On peut du reste toujours ramener l'élévation au carré d'un nombre au cas où il est compris entre 1 et 10, et l'extraction de la racine carrée au cas où il est compris entre 1 et 100.

Formation des cubes. — Pour faire le cube d'un nombre, on renverse la réglette; on emploie l'échelle inférieure de la règle et ce qui a été appelé première échelle de la réglette.

Mettre en coïncidence les traits indiquant sur chacune de ces échelles le nombre dont on veut avoir le cube; lire ce dernier sur l'échelle supérieure de la règle en regard du trait 1 de la réglette qui est à la droite du lecteur. La valeur du 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle est alors le cube de celle du 1 gauche de l'échelle inférieure, c'est à dire qu'elle ne peut être que 0,001, 1, 1 000, etc.; le trait 1 milieu et le trait 1 droite ont des valeurs respectivement 10 et 100 fois plus grandes.

Pour lire tous les cubes par ce procédé, il faudrait trois échelles à la partie supérieure de la règle. Les nombres qui devraient se lire sur la 3e échelle, se liront sur la 1re (qui la remplace) en regard du trait 1 de la réglette, qui est à la gauche du lecteur; alors il faut attribuer au trait 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle les valeurs 0,1, 100, etc., du trait 1 droite, qui n'est autre chose que le trait 1 gauche de la 3me échelle.

La formation des cubes peut aussi s'effectuer sans renverser la réglette.

Extraction des racines cubiques. — Pour l'extraction de la racine cubique, le procédé est inverse; la réglette est renversée.

Lire le nombre dont on veut avoir la racine cubique sur l'échelle supérieure de la règle, en attribuant au 1 gauche de cette échelle les valeurs 0,001, 1, 1 000, etc., cubes de 0,1, 1, 10, etc. Mettre en regard de ce nombre le trait 1 de la réglette qui est à la droite du lecteur.

Si le nombre devait être lu sur la 3me échelle dont nous avons parlé plus haut, mettre le trait 1 de la réglette qui est à la gauche du lecteur en regard de ce nombre lu sur la 1re échelle. Chercher par tâtonnement le nombre dont les traits réels ou fictifs sur l'échelle inférieure de la règle et sur la 1re échelle de la réglette (qui se trouve ici à la droite du lecteur) sont en regard. Ce nombre est la racine cubique cherchée.

On peut du reste toujours ramener l'élévation au cube d'un nombre au cas où il est compris entre 1 et 10, et l'extraction de sa racine cubique au cas où il est compris entre 1 et 1 000.

Sinus, Tangentes. — L'échelle S du revers de la réglette est l'échelle des sinus. Les longueurs, comptées à partir de l'extrémité gauche de cette échelle jusqu'à 1, 2, 3, etc., représentent les logarithmes des sinus naturels des angles de 1°, 2°, 3°, etc., mesurés dans une circonférence de rayon 100. Le dernier trait à droite correspond à sin 90°. Le premier trait à droite de l'extrémité gauche de l'échelle correspond à sin 40.

L'échelle T, échelle des tangentes, est construite de la même manière. On met l'échelle dont on veut se servir en contact avec l'échelle supérieure de la règle.

Si l'on fait coïncider les extrémités des échelles S ou T avec les extrémités de l'échelle supérieure, on lira en face des traits 1, 2, 3, etc., les sinus ou les tangentes de ces angles.

En attribuant au trait 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle la valeur 0,01, et, par suite, au trait 1 droite la valeur 1, on aura les valeurs de ces lignes trigonométriques dans une circonférence de rayon 1.

On obtiendra la valeur des tangentes des angles plus grands que 45° en divisant 1 par la tangente de l'angle complémentaire.

Ces échelles sont employées dans les calculs où il entre des lignes trigonométriques, de la même manière que les échelles ordinaires des nombres.

Logarithmes. — Le revers de la réglette contient aussi une échelle divisée en parties égales; elle sert à mesurer les longueurs représentant, sur l'échelle inférieure de la règle, les parties décimales des logarithmes des nombres. La réglette étant dans sa position ordinaire, amener le trait 1 gauche de la réglette sur le nombre dont on veut avoir le logarithme; lire ce dernier sur l'échelle des parties égales en regard du trait tracé sur le biseau de l'extrémité droite de la règle. Par exemple, pour 2 on trouve 301 qu'il faut lire 0,301.

Divisions en millimètres. — L'échelle du biseau sera employée comme double décimètre. L'échelle placée sur la face opposée à celle du biseau est divisée en millimètres; elle commence à l'extrémité de la règle; cela est indispensable pour mesurer certaines dimensions.

On mesure les longueurs qui dépassent $0^{m}26$ en allongeant la règle au moyen de la réglette, qu'on sort plus ou moins de sa coulisse. La longueur est lue à l'extrémité gauche de la réglette, dans le fond de la coulisse.

Table analytique des Matières.

Pages.

INTRODUCTION.

Chapitre I.

EXÉCUTION, DISCUSSION ET COMPTE-RENDU DES ESSAIS.

Classification des méthodes d'essai 1
Mesures directes. Erreurs systématiques et erreurs fortuites. . 2
Mesures indirectes. Erreur limite et erreur probable 5
Conditions les plus favorables d'une mesure indirecte 8
Rapports à établir entre les erreurs partielles d'un résultat indirect 12
Opérations numériques effectuées sur des valeurs approximatives. Règles à calcul 14
Interpolation 16
Préparation d'un essai. Notes d'expérience. Rapports. Représentation graphique des résultats 16

Chapitre II.

MESURES GÉOMÉTRIQUES ET MESURES MÉCANIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Longueur et diamètre des conducteurs cylindriques. Jauge Palmer. Jauge à cadran 20

Pages

Mesure des angles. Lecture directe. Lecture par réflexion. Méthode subjective et méthode objective 22
Mesure des forces faibles. Divers modes de suspension des équipages mobiles 27
Mesure des temps. 31
Enregistrement des déviations. Procédé de M. Richard. Procédé photographique. Méthode de l'auteur. Méthode de M. Frölich . . 31
Mesure des vitesses 35
Essai d'une installation motrice à vapeur. 37
Mesure de la puissance mécanique. Indicateur Crosby. Dynamomètre de transmission von Heffner-Altenek. Frein à cordes . . 40

Chapitre III.

MESURES PHOTOMÉTRIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Grandeurs considérées en photométrie 48
Étalons de lumière 51
Système d'unités pratiques. 55
Bases de la photométrie. 56
Méthodes photométriques 60
Degré d'incandescence 63
Photomètre Foucault. 64
Photomètre Lambert et Rumford 64
Photomètre Villarceau 65
Photomètre Bunsen 65
Photomètre Joly 66
Photomètre Lummer et Brodhun 67
Intensité moyenne sphérique 68
Photomètre Rousseau 70
Détermination de l'intensité moyenne sphérique 72
Lumen-mètre de M. Blondel 74
Courbes d'éclairement 75
Photomètre L. Weber 76
Photomètre Mascart 78
Appareil Houston et Kennely 79
Rendement lumineux des lampes à incandescence 80
Rendement lumineux des lampes à arc voltaïque 82

Pages

MESURES ÉLECTRIQUES.

Chapitre IV.

ÉTALONS DE MESURE.

Étalons de résistance. 85
Boites de résistance 90
Rhéostats. 94
Résistances artificielles pour courants intenses 95
Étalons de quantité d'électricité et d'intensité de courant . . . 96
Étalons de force électromotrice 96
Étalons de capacité 102
Étalons d'induction 105

Chapitre V.

COMMUTATEURS ET CLEFS.

Classification d'après le mode de contact. Commutateurs à mercure, à frottement et à pression. 106
Classification d'après le mode d'emploi. Interrupteurs. Inverseurs. Clef de décharge. 108

Chapitre VI.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE.

Classification des appareils utilisés à la mesure des courants. . 111
Description des galvanomètres à aimant fixe 111
Théorie des galvanomètres à aimant fixe 115
Shunts. 119
Détermination de la constante d'un galvanomètre à l'aide d'un couple étalon 121
Emploi du voltamètre pour le tarage des galvanomètres . . . 123
Étude balistique du galvanomètre à aimant fixe et à champ radial. Mesure d'une décharge instantanée. 125

Pages
Constante balistique. Coefficient de sensibilité du galvanomètre. . . 131
Résistance critique 133
Influence de la durée de la décharge 133
Répétition de la décharge pour obtenir une élongation renforcée. 134
Mesure d'une décharge électrique à l'aide d'un galvanomètre pourvu d'un shunt 135

Chapitre VII.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE.

Galvanomètre des tangentes 137
Système Wiedemann. 140
Système Kelvin. 140
Système Obach. 141
Correction pour la torsion des fils de suspension 141
Mesure d'une décharge instantanée à l'aide du galvanomètre à aimant mobile 142
Moyens employés pour développer la sensibilité des galvanomètres à aimant mobile 142
Amortissement du mouvement du système mobile 146
Galvanomètre de torsion de Siemens et Halske. 147

Chapitre VIII.

GALVANOMÈTRES ET AMPÈREMÈTRES DIVERS.

Galvanomètre différentiel. Modèle de Lord Kelvin. Modèle de l'auteur. Réglage et applications 149
Choix d'un galvanomètre. Ampèremètres 154
Ampèremètres à cadre mobile. Système Weston. Système Chauvin et Arnoux 155
Ampèremètres à cadre fixe. Systèmes Deprez et Carpentier, Hummel, Dobrowolsky, Evershed. Graduation . . . . 15[illegible]

Chapitre IX.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES ACTIONS ÉLECTRODYNAMIQUES.

[illegible] . . . . 16[illegible]
[illegible] Weber . . . . 16[illegible]

Pages
Électrodynamomètre de Siemens 166
Électrodynamomètre de M. Fleming 167
Balance électrodynamique de Lord Kelvin 168
Balance absolue de M. Pellat 169

Chapitre X.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES EFFETS CALORIFIQUES.

Ampèremètres à dilatation. Système Holden. Système Hartmann et Braun 171

Chapitre XI.

MESURE DES POTENTIELS BASÉE SUR LES MÉTHODES ÉLECTROSTATIQUES.

MÉTHODE INDIRECTE basée sur l'emploi de l'électromètre absolu de Lord Kelvin 174

MÉTHODES DIRECTES.

Méthodes par comparaisons successives. — Principe de l'électromètre à quadrants 175
Modèles d'électromètres à quadrants de Lord Kelvin, de M. Edelmann, de M. Mascart et de l'auteur. 180
Méthode par réduction à zéro. — Electromètre capillaire de M. Lippmann 185
Méthodes diverses. — Voltmètres électrostatiques de Lord Kelvin, de MM. Ayrton et Mather et de M. Rowland. 180

Chapitre XII.

MESURE DES POTENTIELS PAR LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

MÉTHODES INDIRECTES 187

MÉTHODES DIRECTES.

Méthode par comparaisons successives 188
Méthodes par réduction à zéro. — Méthode de compensation de Poggendorff. 195

Pages

Méthode de Lacoine. 198
Potentiomètre de Clark. 199
Appareil de compensation de M. Feussner 201
Méthodes diverses. — Méthode du voltmètre. Voltmètres industriels. Cas des forces électromotrices alternatives 189
Voltmètre Weston. 193
Voltmètre Cardew. 194

Chapitre XIII.

MESURE DES RÉSISTANCES.

MÉTHODES INDIRECTES.

Méthode de Weber 204
Méthode de la perte de charge 205
Méthode par le voltmètre et l'ampèremètre. 208

MÉTHODES DIRECTES.

Méthode par comparaisons successives. 208
Méthodes par réduction à zéro. — Méthode du galvanomètre différentiel 212
Pont de Wheatstone. Principe de la méthode. Position du galvanomètre et de la pile. Valeurs les plus favorables à donner aux résistances du pont. 216
Pont à bobines. 221
Pont à fil divisé. Méthode de MM. de Nerville et Benoit . . . 223
Pont de Lord Kelvin. 225
Méthodes diverses. — Ohmmètres 210

Chapitre XIV.

MESURE DES CAPACITÉS.

MÉTHODES INDIRECTES.

Méthode par la perte de charge. 228
Méthode de Jenkin 229

MÉTHODES DIRECTES.

Méthode par comparaisons successives. 230
Méthodes par réduction à zéro. — Méthode de M. de Sauty . . 233

Pages

Méthode de M. Gott 235
Méthode de Lord Kelvin 236
Méthodes diverses. — Méthode de Faraday 232

Chapitre XV.

MESURE DES PUISSANCES ÉLECTRIQUES.

Cas d'un courant continu. Wattmètre. 238
Cas d'un courant périodique 240
Conducteurs sans réactance 240
Conducteurs avec réactance. Emploi du wattmètre 243
Méthode de MM. Ayrton et Sumpner 244
Méthode de M. Fleming 247
Méthode du calorimètre. 248
Méthode électrométrique 249
Mesure de la puissance dans le cas des courants polyphasés. . 251

Chapitre XVI.

COMPTEURS ÉLECTRIQUES.

Coulombmètres et Joulemètres 254
Coulombmètre Edison 255
Compteurs Aron 256
Compteur Aron pour courants triphasés 258
Coulombmètre de Ferranti 259
Joulemètre E. Thomson 260
Coulombmètre Schallenberger 261
Compteur Frager. 262
Compteur Brillié 262
Tarage des compteurs 264

Chapitre XVII.

MESURE D'UNE DIFFÉRENCE DE PHASE.

Méthode de Blakesley 266
Méthode graphique de Janet pour déterminer une différence de phase entre un potentiel et un courant 267

Pages

Chapitre XVIII.

MESURE DES COEFFICIENTS D'INDUCTION.

Définitions 268

MÉTHODES INDIRECTES.

Méthode de Lord Rayleigh pour mesurer un coefficient de self-induction en fonction d'une résistance 274

Méthode de M. Joubert 276

Comparaison d'une self-induction et d'une capacité. Méthodes de M. Pirani, de MM. Vaschy et de la Touanne, de M. Sumpner et de M. Kempe 277

Comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle avec un coefficient de self-induction. Méthode de Maxwell 280

Comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle et d'une capacité. Méthodes de comparaison et de réduction à zéro de M. Carey-Foster 282

MÉTHODE DIRECTE *par comparaisons successives.* — Comparaison du coefficient de self-induction d'une bobine à celui d'une bobine étalon. Emploi du commutateur de MM Ayrton et Perry . . . 271

MESURES MAGNÉTIQUES.

Chapitre XIX.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHAMPS MAGNÉTIQUES.

Détermination de l'intensité horizontale du champ terrestre. Méthode du magnétomètre de Gauss 286

Inclinomètre de Weber 290

Mesure de l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer d'une dynamo. Méthode par induction. Méthode basée sur le phénomène de Hall 292

Chapitre XX.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE ET DE L'HYSTÉRÉSIS.

Généralités 294

Pages

MÉTHODES INDIRECTES.

Méthode magnétométrique de M. Ewing pour déterminer la perméabilité 295
Méthode de M. Rowland, basée sur l'induction 297
Méthode de M. Hopkinson, basée sur l'induction 299
Méthode de M. Ewing, fondée sur l'induction. 301
Méthodes basées sur la force portante Appareils de M. Thompson et de M. Du Bois 303
Méthode de MM. Koepsel et Kennely basée sur une mesure de champ magnétique 305
Perte par hystérésis dans les cycles parcourus rapidement. Méthode de M. Ewing 306
Méthode du wattmètre pour apprécier les pertes dans le fer des noyaux des transformateurs. 308
MÉTHODES DIRECTES *par comparaisons successives*. — Méthode de M. Bruger pour la mesure de la perméabilité. 305
Méthode de M. Ewing pour la mesure de l'hystérésis 309

APPLICATIONS.

Chapitre XXI.

RÉSISTANCE D'UN GALVANOMÈTRE.

MÉTHODES DIRECTES.

Méthode par réduction à zéro. — Méthode de Lord Kelvin. . 315
Méthodes diverses. — Méthode des déviations réduites . . . 311
Méthode d'égale déviation 313

Chapitre XXII.

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES.

MÉTHODES DIRECTES.

Méthode par comparaisons successives 318
Méthodes par réduction à zéro. — Méthode de M. Bouty . . 318
Méthode de M. Kohlrausch 319
Méthodes diverses. — Méthode par substitution 317

Pages

Chapitre XXIII.

RÉSISTANCE DES TERRES.

Objet de la mesure 321
Cas de deux lignes paralleles 321
Autre méthode. 322
Mesure de la résistance des terres d'un paratonnerre 322

Chapitre XXIV.

DÉTERMINATION DES RÉSISTIBILITÉS.

Résistibilité des conducteurs 324
Résistibilité des électrolytes 327
Résistibilité des diélectriques 327

Chapitre XXV.

RÉSISTANCE DES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

Détermination de la résistance d'un câble électrique à l'usine . 328
Détermination de la résistance d'une canalisation posée . . . 328

Chapitre XXVI.

ISOLEMENT DES CANALISATIONS.

Isolement des lignes aériennes 331
Isolement des cables recouverts de gutta-percha 332
Isolement des joints des câbles isolés à la gutta-percha. . . . 334
Isolement des cables industriels 335

Chapitre XXVII.

CAPACITÉ DES CANALISATIONS.

Précautions à prendre dans la mesure de la capacité des canalisations 337

Pages

Chapitre XXVIII.

COEFFICIENTS D'INDUCTION DES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

Coefficient d'induction mutuelle 339
Coefficient de self-induction. 339

Chapitre XXIX.

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

Essais périodiques. Méthode par courants reçus 341
Dérangements des lignes télégraphiques 342
Perte en un point de la ligne 343
Méthode de Blavier 346
Méthode de M. Kennely 347
Méthode de la boucle. 347
Communication entre deux lignes voisines 348
Interruption d'une ligne 349

Chapitre XXX.

ESSAIS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.

Isolement des réseaux 350
Mesure de l'isolement des réseaux et localisation des fautes. Méthodes applicables lors d'un arrêt du service. Méthode de la boucle. Méthode de l'auteur. 351
Localisation des fautes d'un réseau pendant le service. Méthodes de M. Frisch, de M. Frölich et de M. Hering 353
Indicateurs de terre et dispositifs automatiques pour la localisation des fautes dans les réseaux en service 356

Chapitre XXXI.

FORCE ÉLECTROMOTRICE DES PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

Méthodes de mesure. 360

Pages

RÉSISTANCE INTÉRIEURE DES PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

MÉTHODES DIRECTES.

Méthodes par réduction à zéro. — Méthode de Mance 363
Méthode de Kohlrausch. 364
Méthode de M. Uppenborn 364
Méthode de M. Boccali 365
Méthodes diverses. — Méthode des déviations réduites 361
Méthode des déviations égales 362
Méthode par le voltmètre 366
Méthode de Munro 367

Chapitre XXXII.

ACCUMULATEURS.

Objet des essais 369

Chapitre XXXIII.

GÉNÉRATEURS ET MOTEURS A COURANT CONTINU.

Établissement d'un laboratoire de mesures industrielles . . . 372
Essais antérieurs à la construction d'une dynamo. 374
Essais effectués après la construction 375
Mesure des résistances électriques d'une dynamo 376
Répartition des potentiels au collecteur 377
Mesures thermométriques 379
Détermination directe du rendement d'une dynamo par la combinaison de mesures mécaniques et de mesures électriques . . . 379
Méthode de MM. Hopkinson 384
Méthode de MM. Fontaine et Cardew. 386
Méthode de Lord Rayleigh et de M. Kapp 387
Méthode de M. Swinburne 390
on des deux méthodes précédentes 393
n de la méthode de M. Swinburne 395
le M. Mordey pour séparer les pertes par courants de
par hystérésis dans l'induit 398
le M. Housman 399

Pages

Chapitre XXXIV.

ALTERNATEURS ET ALTERNOMOTEURS.

Courbes de force électromotrice d'un alternateur. Procédés de M. Joubert, de M. Blondel et de l'auteur 402
Mesure du rendement industriel d'un alternateur. Procédé direct 406
Méthodes de M. Mordey 407
Méthode de MM. Ayrton et Sumpner 408
Autres méthodes de M. Mordey 409
Méthode de M. Blondel 410

Chapitre XXXV.

TRANSFORMATEURS.

Objet des essais 412
Mesure directe du rendement 413
Détermination indirecte du rendement par la puissance consommée à vide 415
Méthode de M. Sumpner 416
Facteur de puissance des transformateurs 419
Dérivations de flux magnétique dans les transformateurs . . . 419
Pertes par hystérésis dans les transformateurs 420

RENSEIGNEMENTS PRATIQUES.

Propriétés des conducteurs électriques industriels 427
Résistance de 1 mètre de fil conducteur pour divers diamètres et résistibilités 428
Accroissement de la résistance d'un fil de cuivre avec la température 430
Résistibilité de l'eau acidulée sulfurique 431
Résistibilité de diverses solutions aqueuses 431
Instruction pour la règle à calcul de M. Mannheim 432

Table alphabétique des Matières.

Nos DES PAGES.

A

Accumulateurs. Essais, 369.
Alternateurs et alternomoteurs. Mesure du rendement : procédé direct, 406 ; procédés d'Ayrton et Sumpner, 408 ; de Blondel, 410 ; de Mordey, 407 ; trace des courbes de force électromotrice, 402 ; procédés de Blondel, 404, 405 ; de Joubert, 403 ; d'Eric Gérard, 404.
Alternomoteurs. Voir alternateurs.
Ampère. Unité d'intensité de courant, 96.
Ampèremètre, 155 ; à cadre fixe : modèle Deprez et Carpentier, 158 ; Dobrowolski, 160 ; Evershed, 161 ; Hummel, 159 ; à cadre mobile : modèles Arnoux et Chauvin, 157 ; Weston, 155 ; à dilatation : modèles Hartmann et Braun, 172 ; Holden, 171 ; graduation, 162.
Angles. Mesure par lecture directe, 22 ; par réflexion, 22 ; méthodes objective de Lord Kelvin, 22 ; subjective de Gauss et Poggendorff, 23.
Arnoux et Chauvin. Ampèremètre, 155.
Aron. Compteurs, 256, 258.
Ayrton. Mode de shuntage des galvanomètres, 120 ; *et Mather*. Galvanomètre, 114 ; voltmètre électrostatique, 184 ; *et Perry*. Commutateur pour la mesure des coefficients d'induction, 273 ; ohmmètre, 211 ; *et Sumpner*. Mesure de la puissance électrique au moyen de trois voltmètres, 244 ; du rendement des alternateurs, 408.

B

Balances électrodynamiques de Lord Kelvin, 168 ; de Pellat, 160.
Behn-Eschenburg. Mesure de la puissance électrique, 248.
Benoît et de Nerville. Méthode d'emploi du pont de Wheatstone, 223.
Blakesley. Mesure des différences de phase, 266.
Blavier. Localisation des pertes sur les lignes télégraphiques, 346.
Blondel. Lumen-mètre, 74 ; mesure du rendement des alternateurs, 410 ; tracé des courbes de force électromotrice des alternateurs, 404, 405.
Blondlot et Curie. Wattmètre électrostatique, 250.
Boccali. Mesure de la résistance des piles, 365.

Bougies. Étalons d'intensité lumineuse, 52.
Bouty. Mesure de la résistance des électrolytes, 318.
Braun et Hartmann. Ampèremètre, 172.
Brillié. Joulemètre, 262.
Brodhun et Lummer. Photomètre, 67.
Bruger. Mesure de la perméabilité, 305.
Bunsen. Photomètre, 65.

C

Canalisations électriques. Mesure de la capacité, 337 ; de la résistance avant la pose, 328 ; après la pose, 328 ; de l'isolement des câbles industriels, 335 ; des câbles recouverts de gutta-percha, 332 ; des isolateurs, 332 ; des joints des câbles, 334 ; des lignes aériennes, 331 ; des coefficients d'induction, 339.
Capacité. Etalons, 102 ; mesure par les méthodes de comparaison, 230 ; de Faraday, 232 ; de Gott, 235 ; de Jenkin, 229 ; de Lord Kelvin, 236 ; de perte de charge, 228 ; de Sauty, 233 ; des canalisations, 337.
Carcel. Lampe, 51.
Cardew. Voltmètre, 194 ; *et Fontaine*. Mesure du rendement des dynamos, 386.
Carey-Foster. Mesure des coefficients d'induction mutuelle, 282.
Carpentier. Ohmmètre, 212 ; *et Deprez*. Ampèremètre, 158.
Champ magnétique. Mesure de l'intensité par induction, 292 ; par l'accroissement de résistance du bismuth, 293 ; par l'inclinomètre, 290 ; par le magnétomètre, 286.
Chaudières. Essais, 38.
Chauvin et Arnoux. Ampèremètre, 155.
Clark. Elément de pile étalon, modèle du Board of Trade, 96 ; du Reichsanstalt, 99 ; potentiomètre, 199.
Clefs et commutateurs, 106 ; à frottement, 107 ; à mercure, 106 ; à pression, 108 ; de décharge, 109 ; d'interruption, 108 ; d'inversion, 108.
Coefficients de self-induction. Définitions, 268 ; des canalisations, 339 ; étalons, 105 ; mesure par les méthodes de comparaison avec un coefficient d'induction mutuelle, 280 ; de Maxwell, 280 ; avec une capacité, 277 ; de Kempe, 279 ; de Pirani, 277 ; de Sumpner, 279 ; de Vaschy et de la Touanne, 278 ; avec une résistance, 274 ; de Joubert, 276 ; de Lord Rayleigh, 274 ; avec un étalon, 271.
Coefficients d'induction mutuelle des canalisations, 339 ; mesure par les méthodes de comparaison avec un coefficient de self-induction, 280 ; de Maxwell, 280 ; avec une capacité, 282 ; de Carey-Foster, 282.
Commutateurs. Voir clefs.
Compte-secondes, 31 ; *-tours*, 35.
Compteurs, 254 ; Aron, 256, 258 ; Brillié, 262 ; de Ferranti, 259 ; Edison, 254 ; E. Thomson, 260 ; Frager, 262 ; Schallenberger, 261 ; tarage, 264.
Conductibilité des conducteurs industriels, 427.
Coulomb. Unité de quantité d'électricité, 96.
Courants. Etalons, 96 ; mesure par les ampèremètres, 154 ; par les compteurs, 254 ; par les effets calorifiques, 171 ; par les galvanomètres à aimant fixe, 111 ; à aimant mobile, 137 ; par les réactions électrodynamiques, 164.
Crosby. Indicateur pour machine à vapeur, 40.
Curie et Blondlot. Wattmètre électrostatique, 250.

D

Daniell. Elément de pile étalon, 101.
d'Arsonval et Deprez. Galvanomètre, 112.
Décharge électrique. Mesure, 125, 142.
Décrément logarithmique, 129.

Degré d'incandescence, 63.
de Nerville et Benoit. Méthode d'emploi du pont de Wheatstone, 223.
Densité des conducteurs électriques industriels, 427.
Depreț et Carpentier. Ampèremètre, 160; *et d'Arsonval.* Galvanomètre, 112.
Diamètre des conducteurs cylindriques. Mesure, 20.
Diélectriques. Mesure de la résistibilité, 327.
Différence de phase. Mesure par les méthodes de Blakesley, 266; de Janet, 267.
Dobrowolski. Ampèremètre, 160.
Du Bois. Balance magnétique, 305.
Dynamomètre de transmission Von Heffner-Altenek, 43.

E

Eclat intrinsèque. Définition, 50; dimensions, 56; équation de définition, 56; unité pratique, 56.
Eclairement. Courbes d'égal eclairement, 75; définition, 49; dimensions, 56; équation de definition, 56; unité pratique, 55.
Edelmann. Electromètre, 180.
Edison. Coulombmètre, 254.
Electrodynamomètre. Principe, 164; modèles de Fleming, 167; de Siemens, 166; de Weber, 165.
Electrolytes. Mesure de la résistance par les methodes de comparaison de Bouty, 318; de substitution, 317; du pont de Kohlrausch, 319; de la résistibilité, 327.
Electromètre absolu de Lord Kelvin, 174; à quadrants, 173; modeles d'Edelmann, 180; d'Eric Gerard, 181; de Lord Kelvin, 183; de Mascart, 183; capillaire de Lippmann, 185; multicellulaire de Lord Kelvin, 183.
Enregistrement des déviations. Procédés de Frolich, 34; d'Eric Gerard, 33; de Richard, 32; photographique, 33.
Erreurs constantes ou fortuites, 2; limites, 5; probables, 5; systematiques ou variables, 2; rapports à établir entre les erreurs partielles d'un résultat, 12.
Essais. Comptes-rendus, 1; discussion, 1; exécution, 1; notes d'expérience, 16; préparation, 16; rapports, 16; représentation graphique des résultats, 16.
Etalons de capacité, 102; de force électromotrice, 96; d'induction, 105; d'intensité de courant, 96; de lumière, 51; de quantité d'électricité, 96, de résistance, 85.
Evershed. Ampèremètre, 161; ohmmètre, 211; voltmètre, 193.
Ewing. Appareil pour la mesure directe de l'hystérésis, 309; mesure de l'hystérésis dans les cycles rapides, 306; de l'hystérésis et de la perméabilité par le magnétomètre, 295; par les effets d'induction, 301.

F

Faraday. Mesure des capacités, 232.
Ferranti (de). Coulombmètre, 259.
Feussner. Mesure des potentiels et des courants, 201.
Fleming. Electrodynamomètre, 167; mesure de la puissance électrique à l'aide de trois ampèremètres, 247.
Flux lumineux. Définition, 49; dimensions, 56; équation de definition, 56; unité pratique, 55.
Fontaine et Cardew. Mesure du rendement des dynamos, 386.
Force electromotrice. Etalons, 96; des alternateurs, tracé des courbes, 402; des piles, mesure, 360.
Forces mécaniques faibles. Mesure, 27.
Foucault. Photomètre, 64.
Frager. Compteurs, 262.
Frein à cordes, 44.
Frisch. Localisation des fautes d'un réseau en service, 353.
Frolich. Enregistrement des déviations, 34; localisation des fautes d'un réseau en service, 354.

G

Galvanomètres à aimant fixe. Constante balistique, 131; coefficient de sensibilité, 131; description, 111;

étube balistique, 125, 133; emploi pour la mesure d'une décharge, sans shunt, 125; avec shunt, 135; par la méthode de répétition de la décharge, 134; résistance critique, 133; tarage à l'aide du voltamètre, 123; à l'aide d'un couple étalon, 121; à aimant mobile, 137; amortissement du système mobile, 146; correction pour la torsion des fils de suspension, 141; emploi pour la mesure d'une décharge, 142; galvanomètres des tangentes, 137; modèles de Lord Kelvin, 140; de Wiedemann, 140; d'Obach, 141; moyens employés pour modifier la sensibilité, 142; de torsion, 147; différentiels, 149; choix d'un appareil, 154; mesure de la résistance par les méthodes d'égale déviation, 313; de Lord Kelvin, 325; des déviations réduites, 311.
Gauss. Magnétomètre, 286; mesure des angles par la méthode subjective, 23.
Générateurs et moteurs à courant continu. Essais antérieurs à la construction, 374; postérieurs à la construction, 375; mesure de la résistance, 376; mesure du rendement par les méthodes de Fontaine et Cardew, 386; de Lord Rayleigh et Kapp, 387, 393; de Swinburne, 390, 393, 395; directe, 379; d'Hopkinson, 384; mesures thermométriques, 379; répartition des potentiels au collecteur, 377; séparation des pertes par hystérésis et par courants de Foucault par les procédés de Mordey, 398; d'Housman, 399.
Gerard (Eric). Electromètre, 181; enregistrement des déviations, 33; galvanomètres, 112, 151; localisation des pertes dans les canalisations, 352; tracé des courbes de force électromotrice des alternateurs, 404.
Gott. Mesure des capacités, 235.
Gouy. Elément de pile étalon, 100.

H

Hartmann et Braun. Ampèremètre, 172.
Hering. Localisation des fautes d'un réseau en service, 355.
Holden. Ampèremètre, 171.
Hopkinson. Mesure de la perméabilité et de l'hystérésis, 299; du rendement des dynamos, 384.
Hospitalier. Préface.
Housman. Séparation des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les dynamos, 399.
Houston et Kennely. Photomètre, 79.
Hummel. Ampèremètre, 159.
Hystérésis. Mesure par la balance de Du Bois, 305; par le magnétomètre, 295; par le perméamètre de Thompson, 303; par les méthodes d'Ewing, 301, 306, 309; d'Hopkinson, 299; de Rowland, 297; du wattmètre, 308; recherche des pertes dans les dynamos, 398, 399; dans les transformateurs, 420.

I

Illumination. Définition, 50; dimensions, 56; équation de définition, 56; unité pratique, 56.
Inclinomètre, 290.
Indicateurs pour machine à vapeur, 40.
Installation motrice à vapeur. Essais, 37.
Intensité lumineuse. Définition, 48; dimensions, 56; équation de définition, 56; moyenne sphérique, 69, 72; unités, 55.
Interpolation, 16
Interrupteurs, 108.
Inverseurs, 108.
Isolateurs. Mesure de l'isolement, 332.

J

Janet. Mesure des différences de phase, 267.
Jauge à cadran, 20; Palmer, 20.
Jenkin. Mesure des capacités, 229.
Joints des câbles. Mesure de l'isolement, 334.
Joly. Photomètre, 66.
Jones. Synchronisation de deux pendules, 264.

Joubert. Mesure des coefficients de self-induction, 276; tracé des courbes de force électromotrice des alternateurs, 403.

K

Kapp et lord Rayleigh. Mesure du rendement des dynamos, 387, 393.
Kelvin (Lord). Balance électrodynamique, 168; électromètres absolu, 174; à quadrants, 183; multicellulaire, 183; galvanomètres dead-beat, 146; différentiel, 149; industriel, 140; mesure de la résistance des galvanomètres, 315; des angles par la méthode objective, 25; des capacités, 236; pont pour la mesure des faibles résistances, 225.
Kempe. Mesure des coefficients de self-induction, 279.
Kennely. Localisation des pertes sur les lignes électriques, 347; *et Houston*. Photomètre, 79; *et Koepsel*. Mesure de la perméabilité, 306.
Koepsel et Kennely. Mesure de la perméabilité, 306.
Kohlrausch. Mesure de la résistance des électrolytes, 319; des piles, 364.
Kurlbaum et Lummer. Etalon de lumière, 54.

L

Lacoine. Mesure des potentiels, 198.
Lambert et Rumford. Photomètre, 64.
Lampes à arc voltaïque. Rendement lumineux, 82; *à incandescence*. Rendement lumineux, 80.
Leduc. Mesure des champs magnétiques, 293.
Lignes télégraphiques. Essais périodiques par courants reçus, 340; dérangements, 342; communication entre deux lignes, 348; interruption, 341; pertes à terre, localisation, 343; méthode de Blavier, 346; de Kennely, 347; de la boucle, 347.
Lippmann. Électromètre capillaire, 188.
Longueurs. Mesure, 20.
Lumen. Unité pratique de flux lumineux, 55; *-heure*. Unité de quantité de lumière, 56; *-mètre* de Blondel, 74.
Lummer et Brodhun. Photomètre, 67; *et Kurlbaum*. Etalon de lumière, 54.
Lumination. Définition, 50; dimensions, 56; équation de définition, 56; unité pratique, 56.
Lux. Unité pratique d'éclairement, 55.

M

Machines à vapeur. Essais, 39.
Magnetomètre, 286.
Mance. Mesure de la résistance des piles, 363.
Mascart. Electromètre, 183; photomètre, 78.
Mather et Ayrton. Galvanomètre, 114; voltmètre électrostatique, 184.
Maxwell. Mesure des coefficients d'induction, 280.
Merritt et Ryan. Mesure des pertes par hystérésis dans les transformateurs, 420.
Mesures absolues ou indirectes, 5; classification des méthodes, 1; conditions les plus favorables d'une mesure, 8; directes ou relatives, 2; électriques, 85; géométriques, 20; industrielles, laboratoire, 372; magnétiques, 286; mécaniques, 20; par comparaisons successives, 2; par réduction à zéro, 2; photométriques, 48; thermométriques, 379.
Mordey. Mesure du rendement des alternateurs, 407, 409; séparation des pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans les dynamos, 398.
Morelli. Wattmètre électrostatique, 250.
Moteurs à courant continu. Voir Générateurs.
Muirhead. Câble artificiel, 104.
Munro. Mesure de la résistance des piles, 367.

O

Obach. Galvanomètre, 141.
Ohm. Unité de résistance, 86.
Ohmmètres, 210; d'Ayrton et Perry,

211; de Carpentier, 212; d'Evershed, 211.
Opérations numériques effectuées sur des valeurs approximatives, 14.

P

Palmer. Jauge, 20.
Pasqualini. Frein électromagnétique, 383.
Pellat. Balances électrodynamiques, 169.
Perméabilité, 294; mesure par la balance de Du Bois, 305; par le magnétomètre, 295; par les méthodes basées sur l'évaluation d'un champ magnétique, de Bruger, 305; de Koepsel et Kennely, 305; sur la force portante, de Thompson, 303; sur l'induction, d'Ewing, 301; d'Hopkinson, 299; de Rowland, 297.
Perry et Ayrton, Ohmmètre, 211.
Phot. Unité d'illumination, 56.
Photomètres. Emploi, 56; pour la comparaison de foyers de teintes différentes, 58; de foyers très inégaux, 61; modèles de Bunsen, 65; de Foucault, 64; de Joly, 66; de Kennely et Houston, 79; de Lambert et Rumford, 64; de Lummer et Brodhun, 67; de Mascart, 78; de Rousseau, 70; de Villarceau, 65; de Weber, 76; principe, 60.
Picou. Indicateur de terre, 357.
Piles hydro-électriques. Mesure de la force électromotrice, 360; de la résistance par les méthodes de Boccali, 365; de Kohlrausch, 364; de Mance, 363; de Munro, 367; des déviations égales, 362; des déviations réduites, 361; d'Uppenborn, 364; du voltmètre, 366.
Pirani. Mesure des coefficients de self-induction, 277.
Poggendorff. Mesure des angles par la méthode subjective, 23; des potentiels par la méthode de compensation, 195.
Pont de Kelvin, 225; *de Kohlrausch*, 319; *de Wheatstone*, 216; à bobines, 221; à fil divisé, 223.
Potentiels. Mesure par les méthodes électromagnétiques de comparaisons successives, 187; de compensation de Feussner, 201; de Poggendorff, 195; de Lacoine, 198; du potentiomètre de Clark, 199; du voltmètre, 189; par les méthodes électrostatiques, 174; répartition des potentiels au collecteur des dynamos, 377.
Potentiomètres de Clark, 199; de Crompton, 201.
Potier. Mesure électrométrique des puissances électriques, 249.
Puissance électrique. Mesure, 238; cas des courants continus, 238; des courants périodiques, 240; méthodes d'Ayrton et Sumpner, 244; de Fleming, 247; électrométrique, 249; du calorimètre, 248; du wattmètre, 238, 241, 243; des courants polyphasés, 251; *mécanique*. Mesure, 40.
Pyr. Unité d'intensité lumineuse, 55; *par cm²*. Unité d'éclat intrinsèque, 56.

Q

Quantité de lumière. Définition, 51; dimensions, 56; équation de définition, 56; unité pratique, 56.

R

Rayleigh (Lord). Mesure des coefficients de self-induction, 274; *et Kapp*. Mesure du rendement des dynamos, 387, 393.
Règles à calcul, 14; instruction pour l'emploi de la règle de Mannheim, 432.
Rendement. Mesure du rendement des accumulateurs, 369; des alternateurs et alternomoteurs, 406, 407, 408, 409, 410; des générateurs et moteurs à courant continu, 379, 384, 386, 387; des transformateurs, 413, 415, 416.
Réseaux électriques. Isolement, 350; localisation des fautes par les indicateurs de terre automatiques, 356; par les méthodes, applicables en service, de Frisch, 353; de Frölich, 354; d'Hering, 355; applicables lors d'un arrêt de service, 351; de la boucle, 352; d'Eric Gerard, 352.

Résistance électrique. Accroissement de résistance d'un fil de cuivre avec la température, 430; boites, 90; critique d'un galvanomètre, 133; des canalisations, 328; des dynamos, 376; des électrolytes, 317; des galvanomètres, 310; des piles, 361; des terres, 321; d'un mètre de fil conducteur pour des diamètres de 0,05 à 4,0 mm et des résistibilités de 1,6 à 60 microhms-cm, 428, 429; étalons, 85; mesure par les méthodes de comparaisons successives, 208; de l'ampèremètre et du voltmètre, 208; de la perte de charge, 205; de Weber, 204; du galvanomètre différentiel, 212; du pont de Kelvin, 225; du pont de Wheatstone, 216; ohmmètres, 210; rhéostats pour courants intenses, 95.
Résistibilité de l'eau acidulée sulfurique, 431; des conducteurs industriels, 427; des métaux, 88; des solutions aqueuses de chlorure de sodium, de potasse caustique, de soude caustique, de sulfates de cuivre et de zinc, 431; mesure, 324, 327.
Rhéostats, 94.
Richard. Enregistrement des déviations, 32.
Roïti. Mesure de la puissance électrique par le calorimètre, 248.
Rousseau. Photomètre, 70.
Rowland. Mesure de l'hystérésis et de la perméabilité, 297; voltmètre électrostatique, 184.
Rumford et Lambert. Photomètre, 64.
Ryan et Merritt. Mesure des pertes par hystérésis dans les transformateurs, 420.

S

Sauty (de). Mesure des capacités, 233.
Schallenberger. Coulombmètre, 261.
Shunts, 119.
Siemens et Halske. Électrodynamomètre, 167; galvanomètre de torsion, 147; wattmètre, 238.
Stroboscope appliqué à la mesure des vitesses, 37.
Sumpner. Mesure des coefficients de self-induction, 279; du rendement des transformateurs, 416; *et Ayrton.* Mesure de la puissance électrique à l'aide de trois voltmètres, 244; du rendement des alternateurs, 408.
Suspension des équipages mobiles, 27.
Swinburne. Mesure du rendement des dynamos, 390, 393, 395.

T

Tachymètres, 37.
Temps. Mesure, 31.
Ténacité des conducteurs industriels, 427.
Terres. Indicateurs de terre, 356; localisation, 351; mesure de la résistance, 321, 322.
Thompson (Sylv.). Perméamètre, 303.
Thomson (E.) Joulemètre, 260.
Touanne (de la) et Vaschy. Mesure des coefficients de self-induction, 278.
Transformateurs. Essais, 412; mesure des dérivations de flux magnétique, 419; des pertes par hystérésis, 420; du facteur de puissance, 419; du rendement par la méthode directe, 413; par la puissance consommée à vide, 415; par le procédé de Sumpner, 416.

U

Uppenborn. Mesure de la résistance des piles, 364.

V

Vaschy et de la Touanne. Mesure des coefficients de self-induction, 278.
Villarceau. Photomètre, 65.
Violle. Étalon de lumière, 53; unité d'intensité lumineuse, 55.

Vitesse. Mesure, 35.
Voltamètres à argent, 123 ; à cuivre, 124.
Voltmètres à dilatation, modèle de Cardew, 194; électromagnétiques, 189; modèles d'Evershed, 193; de Weston, 193; électrostatiques, modèles d'Ayrton et Mather, 184; multicellulaire de Lord Kelvin, 183; de Rowland, 183.
Von Heffner-Altenek. Dynamomètre de transmission, 43; lampe étalon à acétate d'amyle, 52.

W

Wattmètre. Mesure de la puissance des courants continus, 238; des courants périodiques, 241, 243.
Weber. Electrodynamomètre, 165; inclinomètre, 290; mesure des résistances, 204; photomètre, 76.
Weston. Ampèremètre, 155; élément de pile étalon, 100; voltmètres, 193.
Wheatstone. Pont pour la mesure des résistances, 216.
Wiedemann. Galvanomètre, 140.

APR 1 1 1935